



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

VYUŽITÍ METODY PŘENOSOVÝCH MATIC PŘI ŘEŠENÍ MODÁLNÍCH CHARAKTERISTIK VOKÁLNÍHO TRAKTU

USING OF TRANSFER MATRIX METHOD FOR MODAL CHARACTERISTICS OF VOCAL
TRACT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Patrik Meisner

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Hájek

BRNO 2018

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student: **Patrik Meisner**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Petr Hájek**
Akademický rok: 2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Využití metody přenosových matic při řešení modálních charakteristik vokálního traktu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Chceme-li ověřit modální vlastnosti lidského vokálního traktu, můžeme při prvním přiblížení využít metodu přenosových matic, která je dostatečně jednoduchá a rychlá. Tímto způsobem můžeme elegantně obdržet množství výsledků pro různé tvarované vokální trakty. Jejich modální charakteristiky by mohly přispět při studiu srozumitelnosti jednotlivých samohlásek.

Cíle bakalářské práce:

1. Provedte rešerši literatury týkající se tvorby samohlásek a výpočtových modelů, které tento jev popisují.
2. Navrhněte model vokálního traktu pro danou samohlásku s využitím metody přenosových matic.
3. Srovnejte jeho modální charakteristiky s výpočtem řešeným metodou konečných prvků.
4. Srovnejte výsledky a vyslovte závěry o použitých metodách.

Seznam doporučené literatury:

RADOLF, Vojtěch. Direct and inverse task in acoustics of the human vocal tract. Prague, 2010. Czech Technical University in Prague.

FANT, Gunnar. Acoustic Theory of Speech Production. the Hague: Mouton, the Netherlands, 1960.

TITZE, Ingo R. Principles of Voice Production. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 1994. ISBN 0-13-717893-x.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.

ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.

děkan fakulty

ABSTRAKT

V první části této bakalářské práce je popsána anatomie vokálního traktu, tvorba hlasu a jeho modifikace. V závěru první části jsou uvedeny některé patologie. Obsahem druhé části jsou dříve publikované výpočtové modely vokálního traktu a následně řešena metoda přenosových matic pro českou samohlásku [u:]. Metodou přenosových matic je provedena modální analýza, jejímž výstupem jsou první tři vlastní frekvence. Tyto vypočtené frekvence jsou následně porovnávány s hodnotami v literatuře a s hodnotami získanými metodou konečných prvků.

ABSTRACT

The first part of the bachelor thesis describes anatomy of the vocal tract, voice creation and its modification. Some pathologies are listed at the end of the first part. The contents of second part are previously published computational models of the vocal tract followed by the method of transfer matrices for the Czech vowel [u:]. Modal analysis is performed by the transfer matrix method. The output are first three natural frequencies. Obtained frequencies are compared to values in the literature and to values calculated by the finite element method.

KLÍČOVÁ SLOVA

Biomechanika lidského hlasu, metoda přenosových matic, metoda konečných prvků, vlastní frekvence, modální analýza vokálního traktu, formant, tvorba českých samohlásek

KEYWORDS

Biomechanics of human voice, transfer matrix method, finite element method, natural frequency, modal analysis of vocal tract, formant, Czech vowel formation

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MEISNER, Patrik. *Využití metody přenosových matic při řešení modálních charakteristik vokálního traktu*, Brno, 2018. 61 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedoucí práce Petr HÁJEK

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Petru Hájkovi za vypsání tématu k bakalářské práci, za jeho trpělivost a ochotu při konzultacích.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Petra Hájka a s použitím literatury uvedené v seznamu literatury.

V Brně dne 24. 5. 2017

.....

Patrik Meisner

OBSAH

1	ÚVOD.....	15
2	ANATOMIE VOKÁLNÍHO TRAKTU.....	17
2.1	Dýchací soustava	17
2.1.1	Plíce	18
2.1.2	Dýchací cesty.....	18
2.1.3	Dýchací svaly	18
2.2	Hlasové ústrojí	18
2.2.1	Hrtan	18
2.2.2	Hlasivky	18
2.2.3	Svaly	19
2.3	Modifikační ústrojí	19
2.3.1	Dutina hrdelní	20
2.3.2	Dutina nosní.....	20
2.3.3	Dutina ústní.....	20
3	FYZIOLOGIE A TVORBA LIDSKÉHO HLASU.....	21
3.1	Tvorba lidského hlasu – základní pojmy	21
3.1.1	Fonace.....	21
3.1.2	Vokální trakt	21
3.1.3	Formanty.....	21
3.1.4	Teorie zdroj-filtr	22
3.2	Základní vlastnosti lidského hlasu.....	23
3.2.1	Výška	23
3.2.2	Znělost/neznělost	23
3.2.3	Hlasitost	23
4	PATOLOGIE	25
4.1	Záněty	25
4.2	Nádory	25
4.3	Vliv lidského faktoru	26
4.4	Psychické příčiny.....	26
5	VÝPOČTOVÉ MODELY VOKÁLNÍHO TRAKTU	27
5.1	Pseudo-1D matematické modely vokálního traktu.....	27
5.2	3D matematické modely vokálního traktu.....	27
5.3	3D modely zjednodušených vokálních traktů	28
6	VÝPOČTOVÉ MODELOVÁNÍ VLASTNÍCH FREKVENCÍ VOKÁLNÍHO TRAKTU NASTAVENÉHO PRO SAMOHLÁSKU [U:]	31
6.1	Samohláska [u:]	31
6.2	2D MKP model.....	31
6.2.1	Model materiálu.....	32
6.2.2	Model geometrie.....	32
6.2.3	Model sítě	32
6.2.4	Model okrajových podmínek.....	33
6.2.5	Nastavení programu ANSYS APDL 19.0	34
6.2.6	Řešení MKP.....	34
6.3	Metoda přenosových matic pro kuželový zvukovod	36

6.3.1	Obecné řešení vlnové rovnice	36
6.3.2	Řešení ve tvaru přenosových matic	40
6.3.3	Okrajové podmínky pro vlastní frekvenci jednoho elementu zvukovodu	42
6.3.4	Vlastní frekvence soustavy elementů modelu vokálního traktu	43
6.4	Modální analýza metodou přenosových matic.....	44
6.4.1	Model vokálního traktu řešený metodou přenosových matic	44
6.4.1	Nastavení přenosových matic pro získání vlastních frekvencí	44
6.4.2	Výsledné hodnoty vlastních frekvencí	44
6.5	3D MKP model	46
6.5.1	Model geometrie	46
6.5.2	Model sítě.....	46
6.5.3	Model okrajových podmínek	47
6.5.4	Nastavení programu ANSYS APDL 19.0.....	47
6.5.5	Řešení MKP 3D modelu	47
6.6	Ladění metody přenosových matic	49
6.6.1	Výsledky ladění.....	50
7	ZHODNOCENÍ A DISKUZE	53
8	ZÁVĚR.....	55
9	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	57
10	SEZNAM SYMBOLŮ.....	59
11	SEZNAM PŘÍLOH	61

1 ÚVOD

Jedním ze základních pilířů mezilidské komunikace je schopnost předání myšlenky, skrze pojmenované termíny objektů, vlastnosti objektů a dějů. Základem tohoto typu komunikace je schopnost vydávat speciální artikulované zvuky: řeč, hlasový projev. [1] Tato skutečnost pomohla lidem spolupracovat a vytvořit svět, jak ho známe dnes.

Jedním z prvních hlasových projevů dítěte je pláč. Samotný pláč je pro člověka indikátorem nepohodlného stavu. Dítě se postupem času naučí své problémy pojmenovat a začne plnohodnotně komunikovat s okolím. Tato schopnost mu zůstane po celý život. Ačkoliv je řeč každodenně používanou schopností, člověk si většinou neuvědomuje, jak složitý je proces jejího vzniku, byť jediné hlásky.

Poznání principů vzniku hlasu, hlásky a ve výsledku slov, může pomoci předcházet nemocem, únavě hlasového ústrojí, anebo vyhodnocovat problémy a léčit je. Lékařský obor, který se zabývá hlasem, se nazývá foniatrie. Pro řešení problémů spojených s hlasem je v poslední době rozšířená spolupráce různých oborů; lékařství, matematiky, fyziky, logopedie i biomechaniky. [2]

V biomechanice, oboru aplikujícím znalosti mechaniky těles na organické složky, je řešen vznik hlasu jako zvukové vlny a následně jeho modifikace prostředím pro vznik českých hlásek. Hlásky, v našem případě samohlásky, vznikají modifikací zvuku generovaného hlasivkami změnou geometrie vokálního traktu. [2] Během modifikace jsou dle nastavení vokálního traktu potlačeny, nebo zesíleny některé frekvence. Zesílené frekvence, rezonanční frekvence, popisují polohu maxim ve výsledných frekvenčních spektrech tzv. formantů, které dávají vzniknout konkrétním samohláskám. [2]

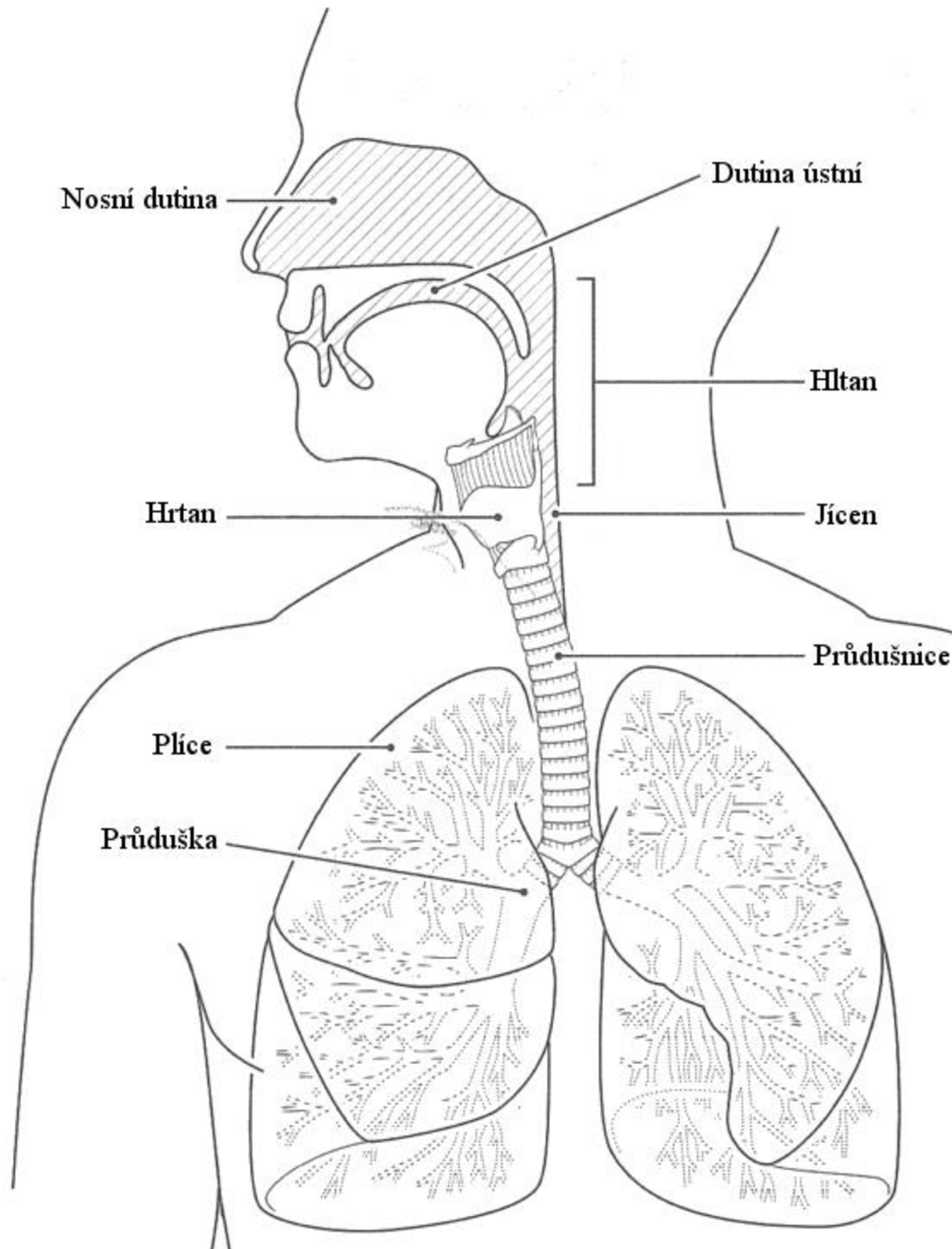
Existují různé metody k získání modálních charakteristik (případně formantů) pro jednotlivé samohlásky. První metodou v práci je metoda konečných prvků (MKP), která je v dnešní době současně nejužívanější metodou pro řešení: jedná se o přesnou, ale časově a hardwarově náročnou metodu. Dále jsou zde počítačové metody, které jsou schopny dosáhnout odpovídajících výsledků v kratším čase a s menší náročností na hardware.

Tato práce nejprve popisuje anatomii spojenou se vznikem a modifikací hlasu, a zvuk generovaný hlasivkami a jeho modifikaci. V další části jsou stručně shrnuty používané výpočtové modely. Následuje odvození metody přenosových matic, výpočet touto metodou v programovacím jazyce Matlab a Python a srovnání s výpočty MKP modelů.

Cílem této práce je srovnání metody přenosových matic při řešení modální analýzy vokálního traktu pro samohlásku [u:] v porovnání s metodou konečných prvků.

2 ANATOMIE VOKÁLNÍHO TRAKTU

Vokální trakt se dělí na tři části: dýchací, hlasovou a modifikační. Schéma vokálního traktu lze vidět na Obr. 1: .



Obr. 1: Dýchací soustava (upraveno) [3]

2.1 Dýchací soustava

Dýchací soustava se skládá z plic, dýchacích cest a dýchacích svalů. [4]

2.1.1 Plíce

Jsou uloženy v hrudní dutině. Jedná se o párový orgán spojený průduškami. Hlavním úkolem plic je při nádechu obohatit hemoglobin o kyslík a při výdechu zbavit těla přebytečného oxidu uhličitého. [4] Vitální objem plic je zhruba 4,5 l vzduchu, ale tato hodnota je značně proměnná. [4] Při klidovém dýchání dojde k výměně 0,5 litru vzduchu mezi plícemi a okolím. Během mluvy se tento objem až ztrojnásobí. [5]

2.1.2 Dýchací cesty

Dýchací cesty se dělí na dolní dýchací cesty a horní dýchací cesty. [6] Do dolních cest dýchacích patří průdušky, průdušnice a hrtan. Do horních dýchacích cest se řadí nosní dutina a nosohltan. Vzduch vstupuje do nosní dutiny nosními dírkami, kde je vzduch zvlhčen a zbaven prachu. Následuje hltan, který se nosohltan, ústní část hltanu a hrtanová část hltanu. Mezi hltanem a hrtanem se nachází hrtanová příklopka, která zabraňuje vstupu potravy do hrtanu. V hrtanu se nachází hlasové ústrojí. Na hrtan navazuje průdušnice, která se dále větví na průdušky. Průdušky končí v plících, kde se dále větví až na průdušinky, které prostupují celými plícemi. [6]

2.1.3 Dýchací svaly

Dýchací svaly se rozdělují na vdechové a výdechové. Do hlavních vdechových svalů patří mezižeberní svaly a bránice. Během nádechu tyto svaly zvětší hrudní dutinu a probíhá nádech. Při výdechu je hrudní dutina zmenšena díky mezižeberním svalům a svalům dutiny břišní. Při klidu se člověk nadechne a vydechne zhruba 16–20× za minutu. [5]

2.2 Hlasové ústrojí

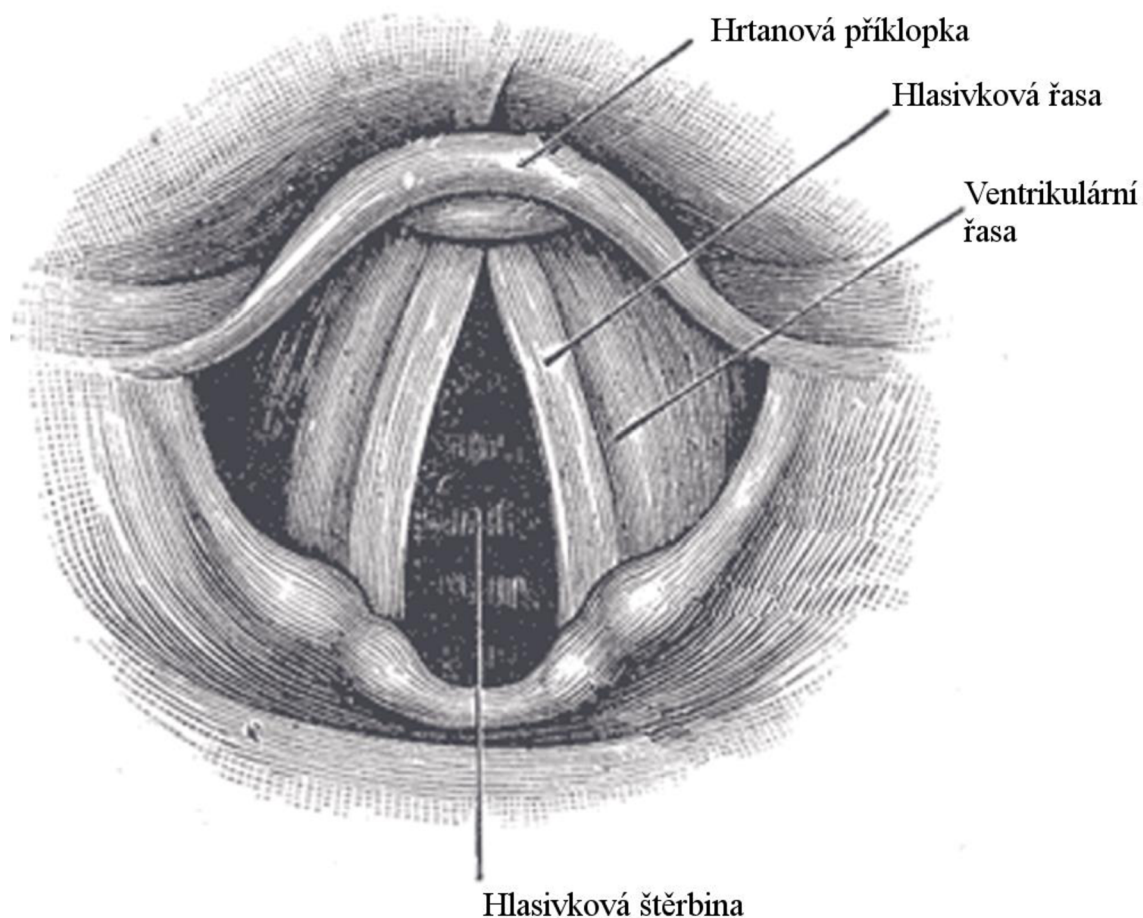
V hlasovém ústrojí vzniká při mluvení zvuk generovaný hlasivkami. Součástí hlasového ústrojí je hrtan, hlasivky a svaly.

2.2.1 Hrtan

Je součástí dýchacích cest. Při respiraci slouží jako ochrana proti vniknutí potravy do plic. Hrtan je trubice o délce 5 až 8 cm. Skládá se z 7 chrupavkovitých částí, zespoda navazuje na průdušnici a shora je uzavírán hrtanovou příklopkou. [4] Chrupavky jsou spojeny klouby. [6] Svalstvo hrtanu umožňuje ovládat pohyb chrupavek, který ovlivňuje natažení hlasivek. [6]

2.2.2 Hlasivky

Hlasivky se nacházejí v nejužším místě hrtanu, mezi chrupavkami hlasivkovými a chrupavkou štítnou. Mezi hlasivkovými řasami se nachází hlasivková štěrbina. [6] Na hlasivkové řasy navazují nepravé hlasové vazy (ventrikulární). Samotné hlasivky jsou složeny z 5 tkáňových vrstev. Na povrchu se nachází šupinový epitel o max. tloušťce 0.1 mm. [3] [7]



Obr. 2: Hlasivky (upraveno) [8]

2.2.3 Svaly

Svaly hrtanu se dělí na vnější, vnitřní a fixační. Vnitřní svaly mají vliv na fonaci a na postavení hlasivek, a tedy na změnu výšky hlasu a jeho intenzitu. Vnitřní svaly se dále dělí na adduktory, abduktory a tensory. [9]

2.3 Modifikační ústrojí

Modifikační hlasové ústrojí se skládá z dutiny ústní, nosní, hrdelní a z měkkého patra. Úkolem modifikačního ústrojí je přeměna zvuku generovaného hlasivkami na hlásky, které známe z běžné řeči. [5]

2.3.1 Dutina hrdelní

Dutina hrdelní se nachází hned nad hlasivkami a pokračuje přes hrtanovou část hltanu, ústní část hltanu až po místo, kde je jazyk při artikulaci nejbližší patru. Má vliv na tvorbu vokálů. [5]

2.3.2 Dutina nosní

Dutina nosní je rezonanční prostor, který navazuje na dutinu hrdelní. Mezi dutinou nosní a ústní se nachází měkké patro, které uzavírá dutinu nosní při polykání. Poloha měkkého patra a jeho napětí má vliv na modulaci a vznik hlásek. Pokud měkké patro neodděluje dutinu nosní a dutinu ústní, vznikají při fonaci nosové hlásky. [5]

2.3.3 Dutina ústní

Dutina ústní pokračuje od hranice dutiny hrdelní až po rty. Mezi zuby a rty se nachází předsíň dutiny ústní. Na měkké patro, které odděluje dutinu ústní a nosní, navazuje tvrdé patro, které je ohraničeno předsíní dutiny ústní. V dutině ústní se nachází jazyk, který v první řadě pomáhá s posouváním soust dále do trávicího traktu. Dále také společně s částmi předsíně dutiny ústní a pohybem dolní čelisti ovlivňuje tvar a velikost rezonančních prostor dutiny ústní při tvorbě hlasu. [5]

3 FYZIOLOGIE A TVORBA LIDSKÉHO HLASU

Lidský hlas je výsledný zvuk, který vychází řečníkovi z úst. V této kapitole bude popsáno, za jakých podmínek lidský hlas vzniká a jaké procesy během jeho vzniku probíhají. Dále budou uvedeny některé jeho charakteristiky.

3.1 Tvorba lidského hlasu – základní pojmy

Tvorba lidského hlasu je složitý proces, do kterého se zapojuje mnoho orgánů, svalů a dutin.

3.1.1 Fonace

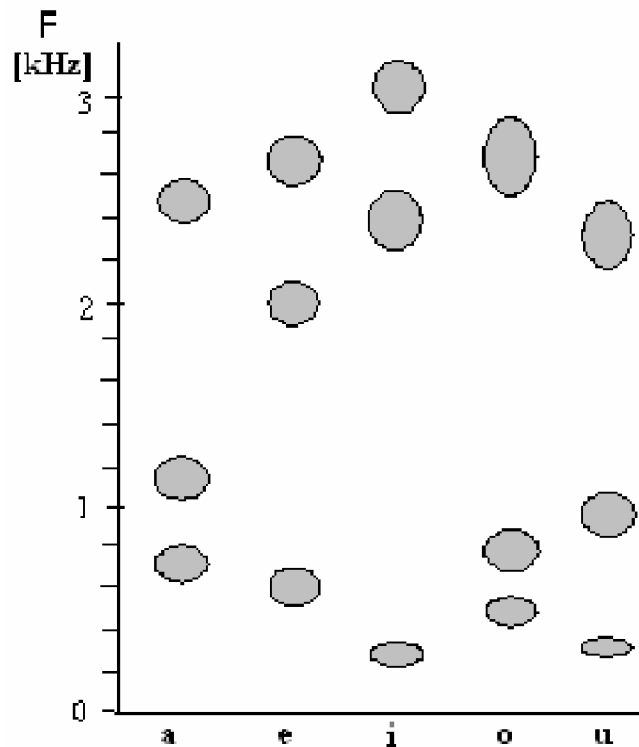
Fonace je fyzikální děj, během něhož vzniká zvuk generovaný hlasivkami o frekvenci f_0 . Pro vznik zvuku generovaného hlasivkami musí nejprve dojít k tzv. hlasivkovému ataku, tzn. hlasivky jsou napínány a přibližovány k sobě. Poté začne proudit vzduch z plic. Následuje oddalování a přibližování hlasivek. [4] To způsobí změnu tlaků pod hlasivkami i nad hlasivkami, jež má za následek vibraci hlasivek a rozvibrování vzduchu nad hlasivkami. Rozvibrovaný (pulsující) proud vzduchu nad hlasivkami můžeme nazývat zvukem generovaným hlasivkami, který pokračuje dále vokálním traktem. [4]

3.1.2 Vokální trakt

Vokální trakt je dutina, ve které je upravován a přeměňován zvuk generovaný hlasivkami na výsledný lidský hlas. Tato dutina je velmi složitá, a proto se rozděluje na menší části (hrdelní, ústní, nosní, čelní kosti klínové, ...). Každá tato část má své akustické vlastnosti. České samohlásky jsou nejvíce ovlivněny polohou jazyka, dutinou hrdelní a ústní. [4]

3.1.3 Formanty

Vlastní frekvence dutin ovlivňují polohu formantů, a proto se podílejí na formování samohlásky. [7] Formanty jsou projevem rezonanční frekvencí ve spektru hlasu. Dle tvaru dutiny ústní se mění jejich frekvence. Pro srozumitelnost běžné řeči je třeba, aby artikulovaná samohláska byla tvořena pomocí dvou až tří formantů. [4] [7] Rozložení formantů při tvorbě jednotlivých samohlásek je vidět na Obr. 3: .



Obr. 3: Srovnání jednotlivých formantů u českých samohlásek [8]

3.1.4 Teorie zdroj-filtr

Tvorba samohlásek je na nejnižší úrovni popsána teorií zdroj-filtr. Schéma teorie zdroj-filtr lze vidět na Obr. 4: . Tvorba hlasu probíhá ve dvou stupních. [7] Hlasivky (zdroj) vybudí prvotní zvuk popsaný frekvenčním spektrem (Obr. 5: (a)) odpovídající fyziologickým aspektům. Ve druhém stupni je zvuk vygenerovaný hlasivkami modifikován dutinami vokálního traktu. (Obr. 5: (b)). Dle postavení dutin vokálního traktu jsou zesilovány frekvenční složky odpovídající vlastní frekvenci dutin a vzniká výsledný signál (Obr. 5: (c)). Ve výsledném signálu jsou patrná maxima, která se označují jako formanty F_1 , F_2 , F_3 . [7] [10]



Obr. 4: Stupně tvoření hlasu [7]



Obr. 5: Formování frekvenčního spektra samohlásky podle teorie zdroj-filtr. [7] [10]

3.2 Základní vlastnosti lidského hlasu

Lidský hlas každého člověka je odlišný. První odlišnosti jsou způsobeny už při tvorbě zvuku generovaného hlasivkami. Aby se daly všechny odlišnosti hlasu popsat, hodnotíme následně uvedené charakteristiky: výška, znělost/neznělost a hlasitost. [4]

3.2.1 Výška

Výška hlasu závisí na frekvenci kmitání hlasivek. [5] Délka hlasivek ovlivňuje základní frekvenci hlasu. U žen jsou hlasivky kratší, tudíž je základní frekvence vyšší. Frekvence se dá ovlivnit i napínáním hlasivek. Hraniční hodnoty frekvence pak udávají rozsah lidského hlasu. Obvyklý rozsah jsou 2 oktávy. [4]

3.2.2 Znělost/neznělost

Pokud je hlas neznělý, znamená to, že mluvčí šeptá. Šepot je způsoben trvalým rozevřením hlasivkové štěrbiny. Hlasivky tedy nepřicházejí do kontaktu a nevzniká zvuk generovaný hlasivkami. Znělý hlas vzniká jako výše popsáný zvuk generovaný hlasivkami. [4]

3.2.3 Hlasitost

Hlasitost je popsána hladinou intenzity zvuku. Rozsah hlasitosti lidského hlasu je 20 dB (při šepotu) až 60 dB (při hlasitém rozhovoru). [4] Hlasitost závisí na amplitudě rozkmitu hlasivek, tedy na silovém napětí hlasivkových svalů a intenzitě proudu vzduchu, vycházejícího z plic. [4]

4 PATOLOGIE

Výše popsané procesy probíhají za předpokladu standardního fyziologického stavu. Člověk je však vystavován různým vnějším vlivům; nemocem, úrazům a dalším změnám, které ovlivňují výsledný hlas. Uvedeme jen některé příklady.

4.1 Záněty

Častou příčinou změny funkčnosti vokálního traktu jsou nemoci bakteriálního a virového původu, a také alergie. [11] Jednou z příznačných nemocí je akutní zánět hrtanu (akutní laryngitida), který způsobí otok hlasivek. Hlasivky zbytní, a to způsobí nepravidelné kmitání, což vnímáme jako chrapot. Pacient může během zánětu přijít dočasně o hlas.

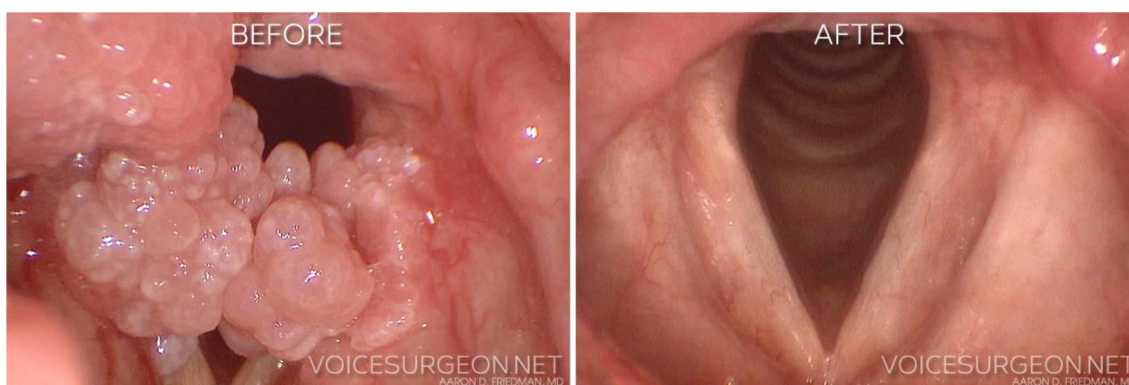
Záněty mohou být způsobeny i vnějšími vlivy, např. smogem, kouřením v kombinaci s nadměrným zatěžováním hlasivek (Reinkeho edém) a hormonálními změnami (edém hlasivek). [11]

Při namáhání hlasivek během zánětů mohou vznikat polypy nebo cysty. Hlasivky jsou mechanicky poškozeny a pod povrchem hlasivek vzniká krevní sraženina, která změní hmotnost hlasivky a má vliv na kmitání (např. Hemoragická cysta). Výsledkem je chrapot. [11]

4.2 Nádory

Při nadměrné konzumaci destilátů a kouření se zvyšuje riziko vzniku karcinomu, a to přímo na úrovni hlasivek nebo pod nimi. [11] Růst karcinomu má za následek chrapot. V pokročilejší fázi může být odebrána část hrtanu. [11]

Virově způsobený nádor (Papilomatosis) má za následek rosolovité nebo květákovité bujení sliznice, které zužuje průchod v dýchacích cestách. Může dokonce vyrůst na hlasivkách, což má za následek zhoršení kvality hlasu. [11]. Na Obr. 6: jsou vidět hlasivky s nádorem Papilomatosis a zdravé hlasivky.



Obr. 6: Srovnání poškozených a zdravých hlasivek [12]

4.3 Vliv lidského faktoru

Hlasivky a hrtan mohou být poškozeny během chirurgických zákroků, vniknutím pevných částic a vdechnutím chemikálií. Následkem může být zhoršená kvalita hlasu nebo i ztráta hlasu. [11]

Změna hlasu může být ovlivněna i chemickou cestou, zejména hormonálními léky. [10]

4.4 Psychické příčiny

Důsledkem stresového prožívání může být nejen porucha hlasu, ale i jeho úplná ztráta. Příznaky jsou podobné jako u akutního zánětu, hlasivky jsou na pohled v pořádku, ale nemohou se pohybovat. Jedná se o psychosomatické onemocnění, léčené většinou psychoterapií v kombinaci s hlasovým cvičením. [11]

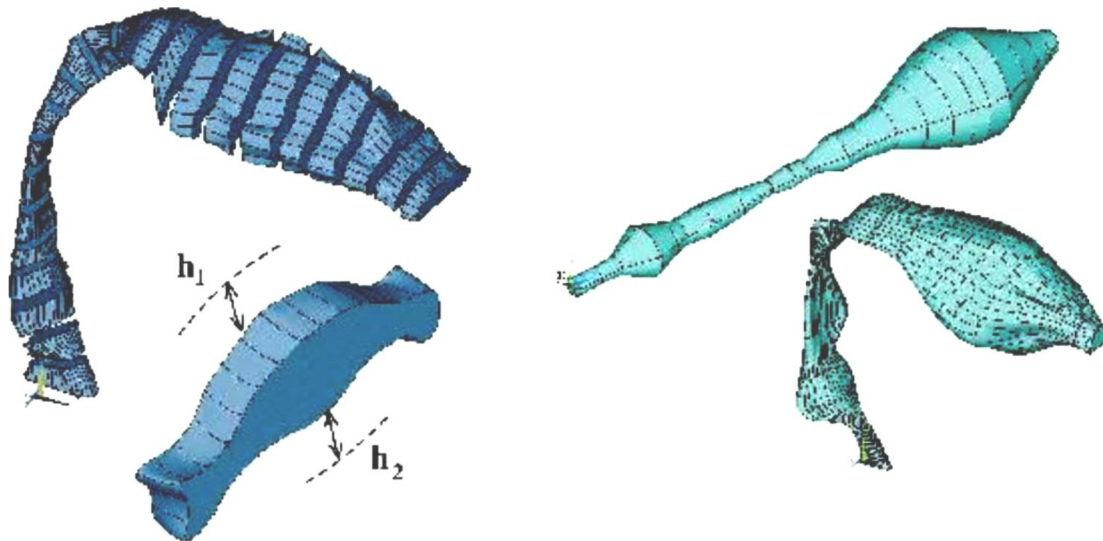
5 VÝPOČTOVÉ MODELY VOKÁLNÍHO TRAKTU

Model je uměle vytvořený reálný nebo abstraktní objekt, obsahující všechny podstatné veličiny zkoumaného objektu a podstatné jevy na něm probíhající. Model je tedy prostředkem k řešení původního problému. [13]

5.1 Pseudo-1D matematické modely vokálního traktu

Jednodimenzionální výpočetní model Švarce a kol. [14] je vytvořen na základně skutečných rozměrů vokálního traktu. [14] Tyto rozměry jsou získány pomocí lékařských zobrazovacích metod (CT, MR, ultrazvuk). Model je vytvořen pouze pro tvorbu jedné samohlásky.

Předpokladem modelu z práce Švarce a kol. [14] je šíření zvukových vln pouze v podélném směru osy traktu. [14] Zjednodušení je provedeno vytvořením válcových elementů, které mají stejný průřez jako zkoumaný prvek (viz Obr. 7:). Výhodou metody je rychlé řešení, na druhou stranu se dá využít jen pro výpočty do 3kHz. [14] [15]



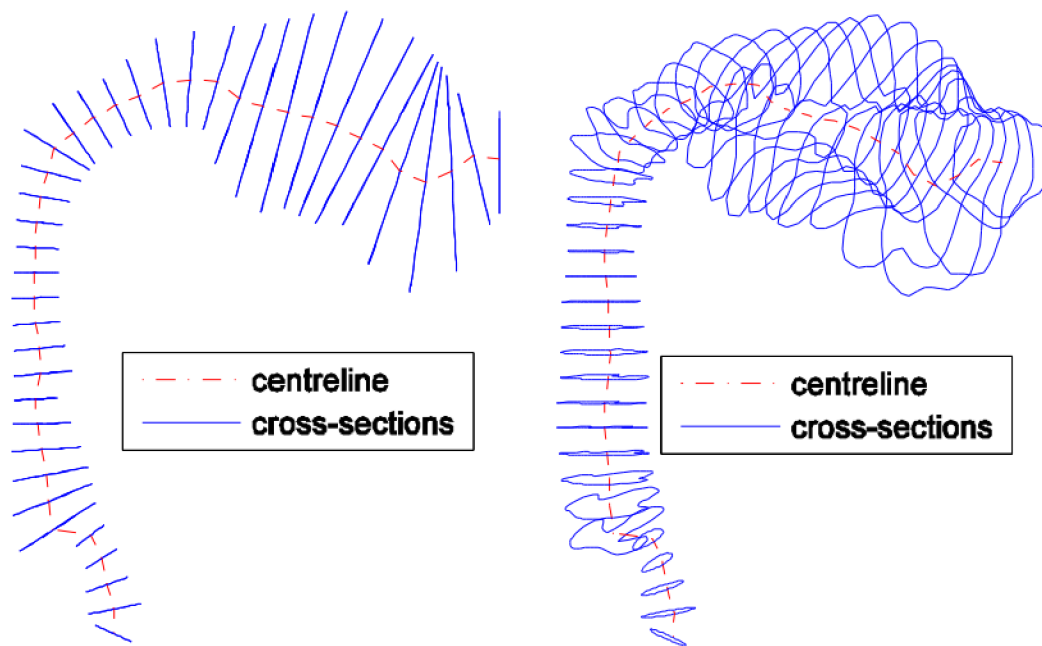
Obr. 7: 3D model vokálního traktu, napravo odvozený model uspořádaný z válcových elementů (upraveno) [14]

5.2 3D matematické modely vokálního traktu

3D modely jsou stejně jako u 1D-pseudomodelů získávány lékařskými zobrazovacími metodami. [15] Výpočet akustického pole často probíhá metodou konečných prvků nebo metodou naladění vlastních frekvencí na požadované hodnoty (tzv. Mode Matching Technique). [14] Výhodami těchto metod jsou přesnější výsledky nezkrácené zjednodušujícími předpoklady. Nevýhodou je výpočetní náročnost. [14]

5.3 3D modely zjednodušených vokálních traktů

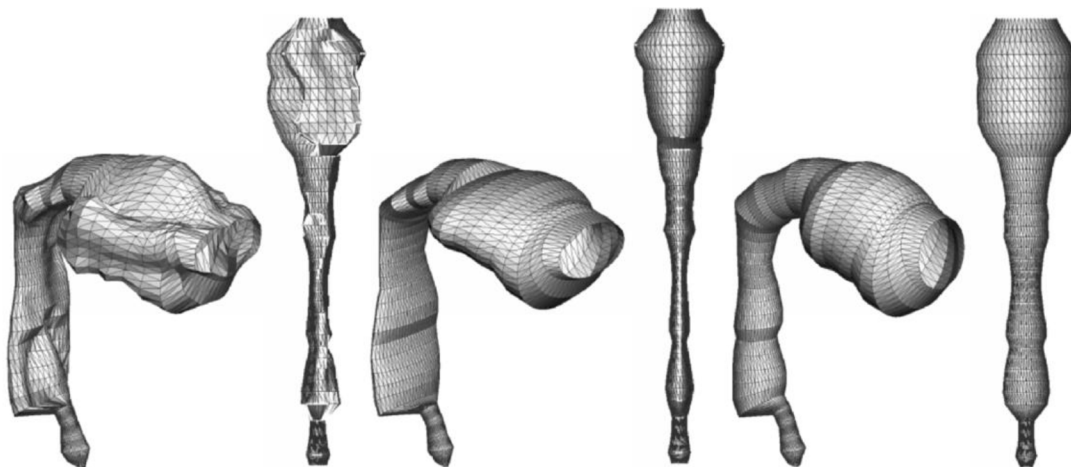
Marc Arnela a kol se ve své práci [16] zabývali vlivem úrovně geometrie modelu na obdržené výsledky. Předpokladem této metody je šíření zvukové vlny podél os průřezů, které jsou na ni kolmé. Kolmost průřezů na osu je důležitá z hlediska aproximace plochy, kterou vlna prochází. Matematický model vychází z dat získaných MR. Model je definován v semipolárních souřadnicích a jeho přesnost je dána volbou počtu ploch. Výsledkem je křivka, která je v uvažovaných průřezech kolmá na zvolené plochy. Obr. 8: zobrazuje osu pro každý průřez. Nalevo je obrázek ve 2D pohledu, napravo je natočený do 3D pohledu. [16]



Obr. 8: Středové osy a průřezy pro samohlásku [a:] [16]

Zjednodušení tvaru je potom provedeno nahrazením původních průřezů odpovídajícími eliptickými, nebo kruhovými průřezy. [16] Na Obr. 9: jsou zleva doprava

nejprve modely s původním průřezem při zjednodušeném ohnutí, a přímé. Dále pak model s eliptickým průřezem a kruhovým průřezem.

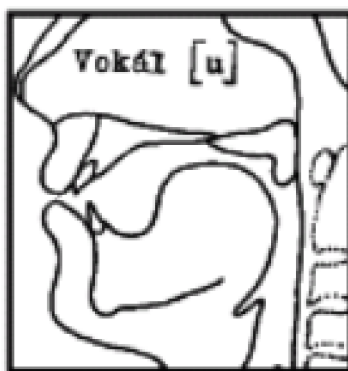


Obr. 9: Tvar vokálního traktu při zjednodušeném ohnutí a přímé s průřezem: původním, eliptickým a kruhovým [16]

6 VÝPOČTOVÉ MODELOVÁNÍ VLASTNÍCH FREKVENCÍ VOKÁLNÍHO TRAKTU NASTAVENÉHO PRO SAMOHLÁSKU [u:]

6.1 Samohláska [u:]

Při tvorbě samohlásky [u:] se jazyk posunuje dozadu a smršťuje se. „Ústa jsou mírně přivřená a ústní otvor je malý. Při výslovnosti jsou aktivní rty, jež se zaokrouhlují a vysunují dopředu.“ [5] Polohu jazyka a nastavení vokálního traktu lze vidět na Obr. 10: . Dle měření Merhauta vzniká česká samohláska [u:] složením dvou formantů, viz Tab. 1:



Obr. 10: Rentgenogram pro vokál [u:] [5]

	F ₁ [Hz]	F ₂ [Hz]
[a:]	420–800	110–1800
[i:]	200–450	1800–3800
[u:]	240–400	600–1100

Tab. 1: Frekvence formantů českých samohlásek naměřené Merhautem [17]

6.2 2D MKP model

Metoda konečných prvků byla řešena v programu ANSYS Mechanical APDL 19.0. Řeší se vlnová rovnice pro neznámou stupeň volnosti tlak.

6.2.1 Model materiálu

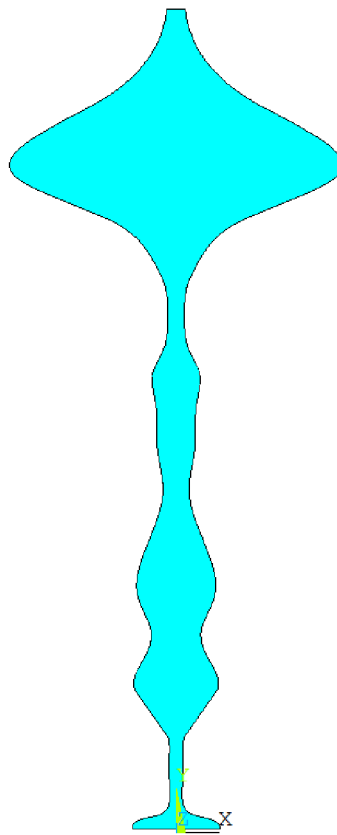
Pro modelování vokálního traktu byl využit model stlačitelného vzduchu s vlastnostmi: rychlost zvuku 353 m/s, hustota $1,205 \text{ kg/m}^3$, viskozita $1,81351 \cdot 10^{-5} \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$. [18] Rychlost zvuku je pro teplotu vzduchu ve vokálním traktu, tedy pro $36 \text{ }^\circ\text{C}$.

6.2.2 Model geometrie

Model geometrie je přejatý z Radolfovy disertační práce. [2] Data pro vytvoření modelu byla získána snímáním vokálního traktu člověka během fonace samohlásek pomocí MR. Naskenovaná 3D geometrie vokálního traktu byla rozdělena na řezy, které byly transformovány na průřezy použitého 2D modelu [2], viz obr. 11.

1
AREAS
TYPE NUM

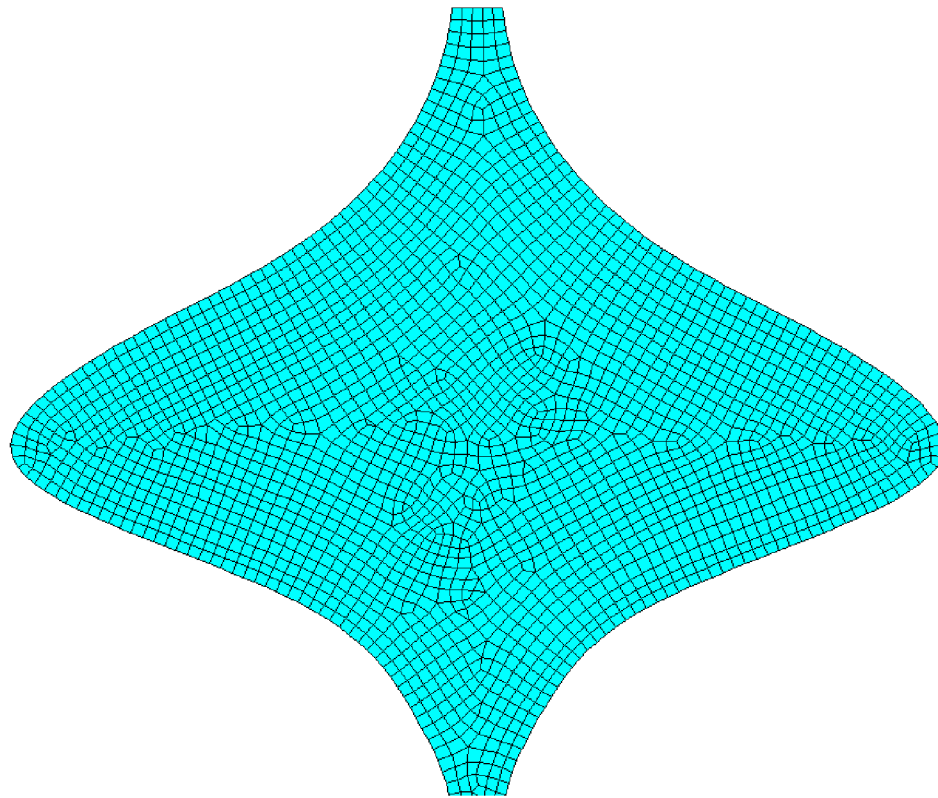
ANSYS
R19.0
Academic



Obr. 11: Model vokálního traktu

6.2.3 Model sítě

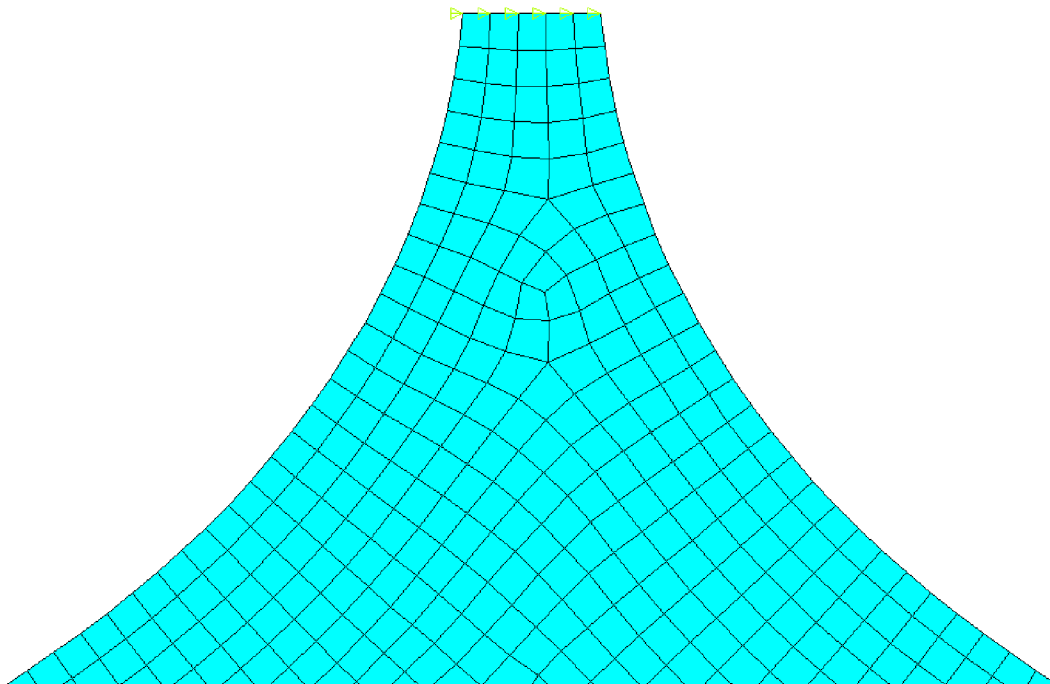
Plocha byla síťována čtyřúhelníky o straně přibližně 1 mm, protože pro modální analýzu stačí i hrubší síť. [19] Použitý typ prvku je čtyřuzlový FLUID 29 s lineární bázovou funkcí. Počet elementů modelu je 3590. Počet uzlů je 3891. Počet stupňů volnosti v uzlu je jeden, a to stupeň volnosti tlak, model má tedy celkem 3891 stupňů volnosti. Detail sítě je zobrazen na Obr. 12: .



Obr. 12: Detail sítě

6.2.4 Model okrajových podmínek.

Model má v každém uzlu stupeň volnosti tlak, jako okrajová podmínka byl tedy použit nulový tlak do uzlů v ústech, čímž se simulují otevřená ústa – tlakový uzel (viz Obr. 13Obr. 13:).



Obr. 13: Model traktu s okrajovými podmínkami

6.2.5 Nastavení programu ANSYS APDL 19.0

Typ analýzy byl zvolen modální, extraction method: Block Lanczos. Globální nastavení matice je symetrické (modální analýza bez tlumení). Jedná se o defaultní nastavení.

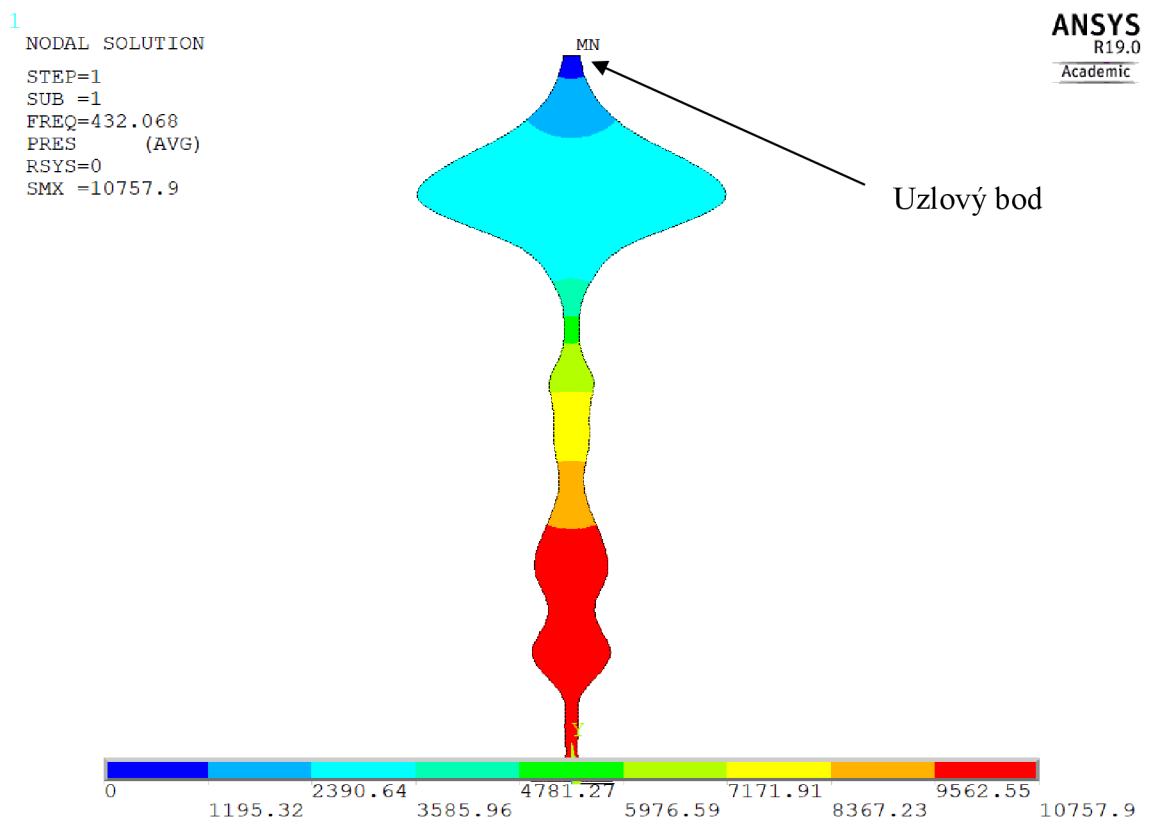
6.2.6 Řešení MKP

Hodnoty prvních tří vlastních frekvencí získané modální analýzou můžeme vidět v tabulce Tab. 2: . Tam jsou srovnány i hodnoty formantů naměřených Merhautem a hodnot vypočtených v práci P. Hájka a spol. [18] Větší odchylka je pouze u třetího formantu. Výpočty v porovnání s literaturou odpovídají rozsahu pouze u 2. formantu, ani 1. formant se však příliš neliší od měření.

	Hodnoty MKP	Merhaut [17]	Hájek [18]
F1 [Hz]	432	240–400	430
F2 [Hz]	889	600–1100	889
F3 [Hz]	1981	–	1931

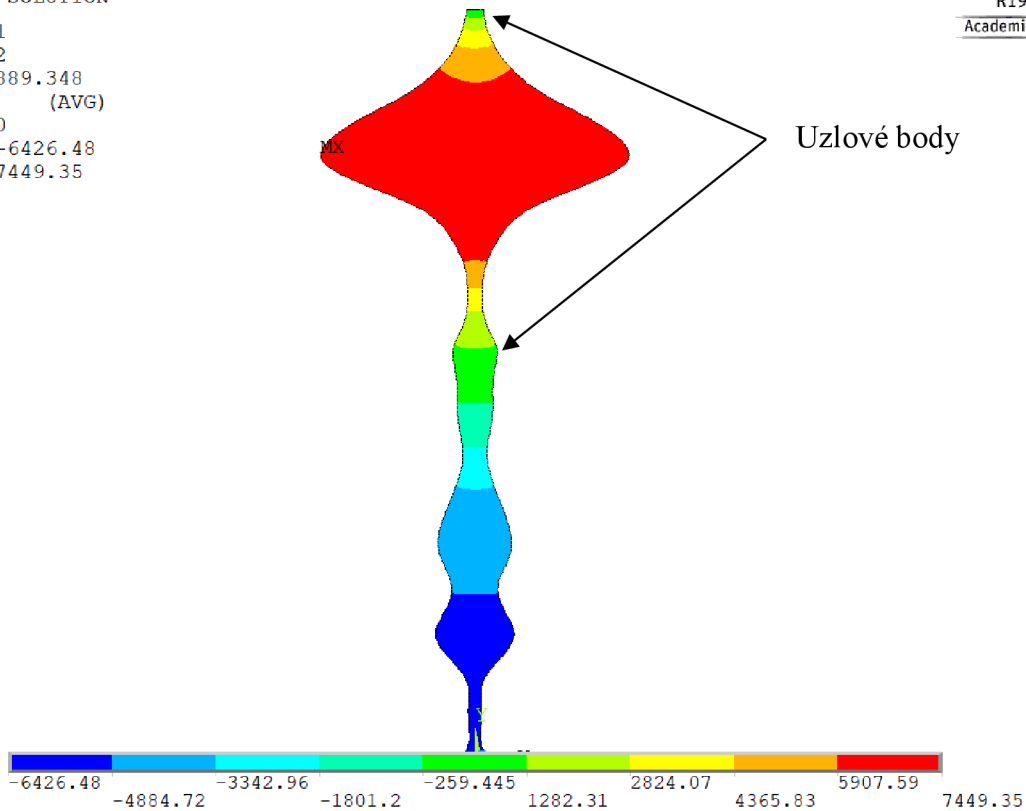
Tab. 2: Vlastní frekvence získané modální analýzou pro samohlásku [u:]

Následující obrázky ukazují rozložení akustického tlaku pro první dvě vlastní frekvence, které ovlivňují první dva formanty, jež jsou nejdůležitější pro srozumitelnost. Všechny tvary kmitů jsou podélné. U prvního vlastního tvaru lze vidět uzel tlaku v ústech, tedy v místě zadané okrajové podmínky, a maximum tlaku u hlasivek, což odpovídá očekávání o podélném prvním vlastním tvaru ve 2D trubici. U druhého vlastního tvaru se objevují dva uzlové body.



Obr. 14: Průběh tlaku pro 1. vlastní frekvenci

1
 NODAL SOLUTION
 STEP=1
 SUB =2
 FREQ=889.348
 PRES (AVG)
 RSYS=0
 SMN =-6426.48
 SMX =7449.35



Obr. 15: Průběh tlaku pro 2. vlastní frekvenci

6.3 Metoda přenosových matic pro kuželový zvukovod

6.3.1 Obecné řešení vlnové rovnice

Pro odvození vlnové rovnice kuželového zvukovodu je třeba uvažovat proměnný průřez $S(x)$ [m²], obecnou rovnici kontinuity (1), Newtonův 2. pohybový zákon (2) a Poissonův zákon (3) [2]

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{1}{S} \cdot \frac{\partial S}{\partial x} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial t} \quad (1)$$

ϕ [m²·s⁻¹] je rychlostní potenciál,
 ρ [kg·m⁻³] je okamžitá hustota prostředí,
 x [m] je podélná souřadnice zvukovodu,
 t [s] je čas, [2]

$$-\frac{\partial p}{\partial t} = \rho \cdot \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} + r_s \cdot \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (2)$$

p [Pa] je akustický tlak,
 r_s [kg·m⁻³·s⁻¹] je specifický akustický odpor zvukovodu na jednotku délky [2]

$$\frac{\partial p}{\partial t} = c_0^2 \cdot \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (3)$$

c_0 [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] je rychlost šíření zvuku v prostředí.

Rychlostní potenciál ϕ je skalární veličina zavedená tak, že platí: [2]

$$\text{grad}\phi = \vec{v} \quad (4)$$

v [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] je vektor akustické rychlosti. [2]

Z rovnic (1), (2) a (3) získáváme vlnovou rovnici pro kuželový zvukovod s tlumením [2]

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{1}{S} \cdot \frac{\partial S}{\partial x} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial x} - \frac{1}{c_0^2} \cdot \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} + \frac{r_s}{\rho} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial t} \right) = 0 \quad (5)$$

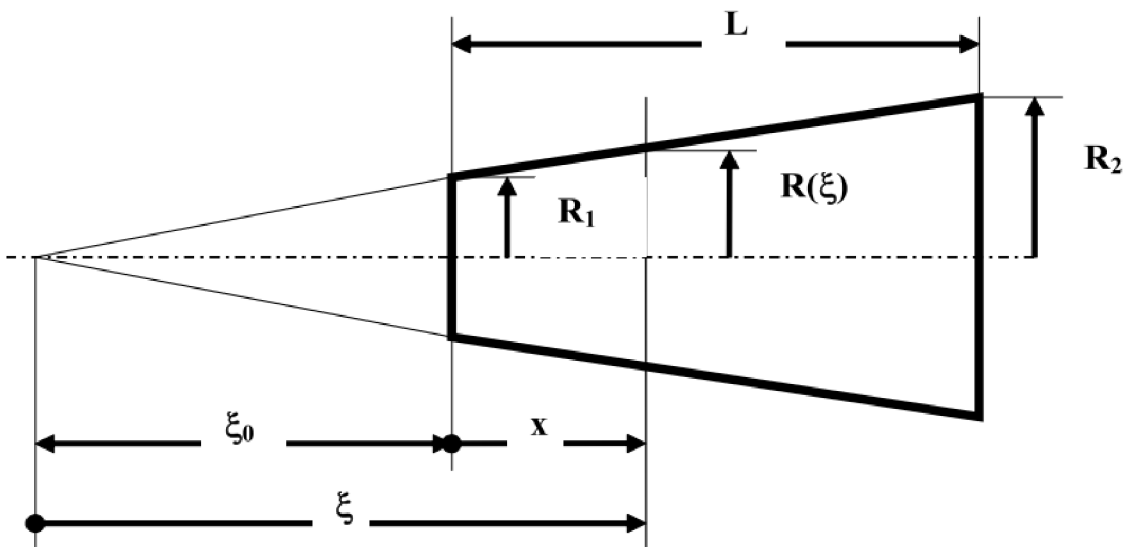
Pro kuželový zvukovod (viz Obr. 16:) je výhodné zavést novou podélnou souřadnici ξ [m] tak, že [2]

$$\xi = \xi_0 + x, \quad \xi \in \langle \xi_0; \xi_0 + L \rangle \quad (6)$$

kde

$$\xi_0 = \frac{R_1}{R_2 - R_1} \cdot L \quad (7)$$

Díky takto zavedené souřadnici ξ platí následující odvození pro rozbíhavý (Obr. 16:) i pro sbíhavý kuželový zvukovod. Ve druhém případě je $\xi_0 < 0$, s rostoucím $x \in \langle 0; L \rangle$ tak klesá ξ^2 a tím i $S(\xi)$ (viz níže). [2]



Obr. 16: Kuželový zvukovod [2]

Protože platí [2]

$$\frac{\partial S}{\partial x} = \frac{\partial S}{\partial \xi} \quad a \quad \frac{\partial \phi}{\partial x} = \frac{\partial \phi}{\partial \xi}$$

Ize vlnovou rovnicí (8) přepsat do tvaru

$$\frac{\partial^2 \phi(\xi, t)}{\partial \xi^2} + \frac{1}{S(\xi)} \cdot \frac{\partial S(\xi)}{\partial \xi} \cdot \frac{\partial \phi(\xi, t)}{\partial \xi} - \frac{1}{c_0^2} \cdot \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} + \frac{r_s}{\rho_0} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial t} \right) = 0 \quad (8)$$

kde jsme v posledním členu opět zanedbali malou změnu hustoty ρ oproti jejímu klidovému stavu ρ_0 . [2]

Jelikož

$$R(\xi) = \frac{R_1}{R_2 - R_1} \cdot \xi \Rightarrow S(\xi) = \pi \cdot \left(\frac{R_2 - R_1}{L} \right)^2 \cdot \xi^2$$

platí

$$\frac{\partial S(\xi)}{\partial \xi} = 2 \cdot S_0 \cdot \xi$$

Dále platí

$$\frac{\partial^2(\phi \cdot \xi)}{\partial \xi^2} = \frac{\partial^2 \phi}{\partial \xi^2} \cdot \xi + 2 \cdot \frac{\partial \phi}{\partial \xi} \quad a \quad \frac{\partial^2(\phi \cdot \xi)}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} \cdot \xi$$

Po dosazení těchto vztahů do rovnice (11) a její úpravě dostáváme konečný tvar vlnové rovnice pro kuželový zvukovod: [2]

$$\frac{\partial^2(\phi \cdot \xi)}{\partial \xi^2} - \frac{1}{c_0^2} \cdot \frac{\partial^2(\phi \cdot \xi)}{\partial t^2} - \frac{r_s}{c_0^2 \cdot \rho_0} \cdot \frac{\partial(\phi \cdot \xi)}{\partial t} = 0 \quad (9)$$

Potom se (12) stává parciální diferenciální rovnicí s konstantními koeficienty a pro harmonický signál s úhlovou frekvencí ω [s⁻¹] hledáme její řešení ve tvaru

$$\phi(\xi, t) \cdot \xi = \psi(\xi) \cdot e^{j \cdot \omega \cdot t} \quad (10)$$

kde ψ [m²·s⁻¹] je amplituda rychlostního potenciálu závislá pouze na souřadnici ξ a j je komplexní jednotka, $j = \sqrt{-1}$. [2]

Po dosazení (10) do (9) dostáváme

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial \xi^2} - (-k^2 + j \cdot k \cdot r_N) \cdot \psi = 0 \quad (11)$$

kde je zavedeno

k [m^{-1}] vlnové číslo,

λ [m] vlnová délka,

ω [s^{-1}] úhlová frekvence harmonického signálu,

f [Hz] frekvence harmonického signálu, a platí

$$k = \frac{\omega}{c_0} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{c_0} = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \quad (12)$$

z_0 [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$] vlnový odpor prostředí,

$$z_0 = c_0 \cdot \rho_0 \quad (13)$$

r_N [m^{-1}] specifický akustický odpor zvukovodu na jednotku délky normovaný vzhledem k vlnovému odporu prostředí,

$$r_N = \frac{r_S}{z_0} \quad (14)$$

ρ_0 [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$] stálá (klidová) hustota prostředí. [2]

Po zavedení komplexního exponentu γ [m^{-1}], lze rovnici (11) přepsat do tvaru [2]

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial \xi^2} - \gamma^2 \cdot \psi = 0 \quad (15)$$

$$\gamma^2 = -k^2 + j \cdot k \cdot r_N \quad (16)$$

$$\gamma = \alpha + j \cdot \beta \quad (17)$$

Rovnice (15) pro amplitudu rychlostního potenciálu ψ má řešení

$$\psi = C_1 \cdot e^{-\gamma \cdot \xi} + C_2 \cdot e^{\gamma \cdot \xi} \quad (18)$$

a tedy rovnice (10) pro rychlostní potenciál ϕ má řešení

$$\phi = (C_1 \cdot e^{-\gamma \cdot \xi} + C_2 \cdot e^{\gamma \cdot \xi}) \cdot \frac{e^{j \cdot \omega \cdot t}}{\xi} \quad (19)$$

Pro akustickou rychlost platí dle (4)

$$v = \frac{\partial \phi}{\partial \xi} \quad (20)$$

Po dosazení do (19)

$$v = \gamma \cdot (C_1 \cdot e^{-\gamma \cdot \xi} + C_2 \cdot e^{\gamma \cdot \xi}) \cdot \frac{e^{j \cdot \omega \cdot t}}{\xi} \quad (21)$$

kde C_1, C_2 [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$] jsou konstanty, které lze získat z okrajových podmínek. Pro objemovou rychlost (objemový tok) [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$] dále platí

$$W = v \cdot S \quad (22)$$

6.3.2 Řešení ve tvaru přenosových matic

Z okrajových podmínek na vstupu a na výstupu získáme konstanty C_1, C_2 a přenosovou matici zvukovodu

$$\xi = \xi_0; \quad p(\xi = \xi_0; t) = p_1(t) = p_{1m} \cdot e^{j \cdot \omega \cdot t} \quad (23)$$

$$v(\xi = \xi_0; t) = v_1(t) = v_{1m} \cdot e^{j \cdot \omega \cdot t} \quad (24)$$

$$\xi = \xi_0 + L; \quad p(\xi = \xi_0 + L; t) = p_2(t) = p_{2m} \cdot e^{j \cdot \omega \cdot t} \quad (25)$$

$$v(\xi = \xi_0 + L; t) = v_2(t) = v_{2m} \cdot e^{j \cdot \omega \cdot t} \quad (26)$$

$$C_1 = \frac{-e^{\gamma \cdot \xi}}{2 \cdot \gamma} \cdot \left(\xi_0 \cdot v_{1m} - \frac{1 - \gamma \cdot \xi_0}{z_0 \cdot (r_N + j \cdot k)} \cdot p_{1m} \right) \quad (27)$$

$$C_2 = \frac{e^{-\gamma \cdot \xi}}{2 \cdot \gamma} \cdot \left(\xi_0 \cdot v_{1m} - \frac{1 + \gamma \cdot \xi_0}{z_0 \cdot (r_N + j \cdot k)} \cdot p_{1m} \right) \quad (28)$$

Dosadíme-li nyní okrajové podmínky do řešení, přičemž místo konstant C_1, C_2 použijeme právě odvozené vztahy, získáme vztahy mezi veličinami na vstupu a výstupu zvukovodu. [2] V maticovém zápisu tyto vztahy tvoří tzv. přenosovou (nebo též kaskádní) matici cylindrického zvukovodu konečné délky L :

Vztah mezi veličinami na vstupu a výstupu kuželového zvukovodu jsou potom

$$\begin{bmatrix} p_2 \\ v_2 \end{bmatrix} = \mathbf{T}_{2,1} \cdot \begin{bmatrix} p_1 \\ v_1 \end{bmatrix} \quad (29)$$

kde přenosová matice kuželového zvukovodu bez tlumení ($r_N = 0$)

$$\mathbf{T}_{2,1} = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \quad (30)$$

má prvky [2]

$$a = \frac{\xi_0}{\xi_0 + L} \cdot \left(\cos(k \cdot L) + \frac{1}{k \cdot \xi_0} \cdot \sin(k \cdot L) \right) \quad (31)$$

$$b = -j \cdot \frac{\xi_0}{\xi_0 + L} \cdot z_0 \cdot \sin(k \cdot L) \quad (32)$$

$$c = -j \cdot \frac{(1 + k^2 \cdot \xi_0 \cdot (\xi_0 + L)) \cdot \sin(k \cdot L) - k \cdot L \cdot \cos(k \cdot L)}{k^2 \cdot (\xi_0 + L)^2 \cdot z_0} \quad (33)$$

$$d = \frac{\xi_0}{\xi_0 + L} \cdot \left(\cos(k \cdot L) - \frac{1}{k \cdot (\xi_0 + L)} \cdot \sin(k \cdot L) \right) \quad (34)$$

V případě, že jsou si oba krajní poloměry kuželového elementu rovny, roste hodnota ξ_0 nade všechny meze, tedy $R_1=R_2 \Rightarrow \xi_0 \rightarrow \infty$ a prvky přenosové matice se zjednoduší na tvar (získáme řešení pro válcový model): [2]

$$a = \cos(k \cdot L) \quad (35)$$

$$b = -j \cdot z_0 \cdot \sin(k \cdot L) \quad (36)$$

$$c = \frac{-j}{z_0} \cdot \sin(k \cdot L) \quad (37)$$

$$d = \cos(k \cdot L) \quad (38)$$

V maticovém zápisu pro kuželový element získáváme [2]

$$\begin{bmatrix} \mathbf{p}_{2m} \\ \mathbf{v}_{2m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\xi_0}{\xi_0 + L} \cdot \left(\cos(k \cdot L) + \frac{1}{k \cdot \xi_0} \cdot \sin(k \cdot L) \right) & -j \cdot \frac{\xi_0}{\xi_0 + L} \cdot z_0 \cdot \sin(k \cdot L) \\ -j \cdot \frac{(1 + k^2 \cdot \xi_0 \cdot (\xi_0 + L)) \cdot \sin(k \cdot L) - k \cdot L \cdot \cos(k \cdot L)}{k^2 \cdot (\xi_0 + L)^2 \cdot z_0} & \frac{\xi_0}{\xi_0 + L} \cdot \left(\cos(k \cdot L) - \frac{1}{k \cdot (\xi_0 + L)} \cdot \sin(k \cdot L) \right) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{p}_{1m} \\ \mathbf{v}_{1m} \end{bmatrix} \quad (39)$$

Pro další aplikace je potřeba přenosové matice upravit do tvaru, který popisuje přenos akustického tlaku a objemové rychlosti (nikoliv akustické) zvukovodem. Po dosazení vztahu tak dostáváme [2]

$$\begin{bmatrix} p_{2m} \\ W_{2m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\xi_0}{\xi_0 + L} \cdot \left(\cos(k \cdot L) + \frac{1}{k \cdot \xi_0} \cdot \sin(k \cdot L) \right) & \frac{-j \cdot z_0}{S_1} \cdot \frac{\xi_0}{\xi_0 + L} \cdot \sin(k \cdot L) \\ -j \cdot S_2 \cdot \frac{(1 + k^2 \cdot \xi_0 \cdot (\xi_0 + L)) \cdot \sin(k \cdot L) - k \cdot L \cdot \cos(k \cdot L)}{k^2 \cdot (\xi_0 + L)^2 \cdot z_0} & \frac{\xi_0}{\xi_0 + L} \cdot \frac{S_2}{S_1} \cdot \left(\cos(k \cdot L) - \frac{1}{k \cdot (\xi_0 + L)} \cdot \sin(k \cdot L) \right) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_{1m} \\ W_{1m} \end{bmatrix} \quad (40)$$

6.3.3 Okrajové podmínky pro vlastní frekvenci jednoho elementu zvukovodu

Dosazením okrajových podmínek do vztahu mezi vstupem a výstupem získáváme vlastní frekvence zvukovodu. V místě otevření zvukovodu je akustický tlak $p = 0$, v místě uzavření zvukovodu je akustická rychlost $v = 0$ nebo objemová rychlost $W = 0$. [2]

Pro okrajové podmínky „U–O“ (uzavřený vstup – hlasivky, otevřený výstup – ústa) dostáváme

$$\begin{bmatrix} 0 \\ v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (41)$$

z čehož vyplývá

$$a = 0$$

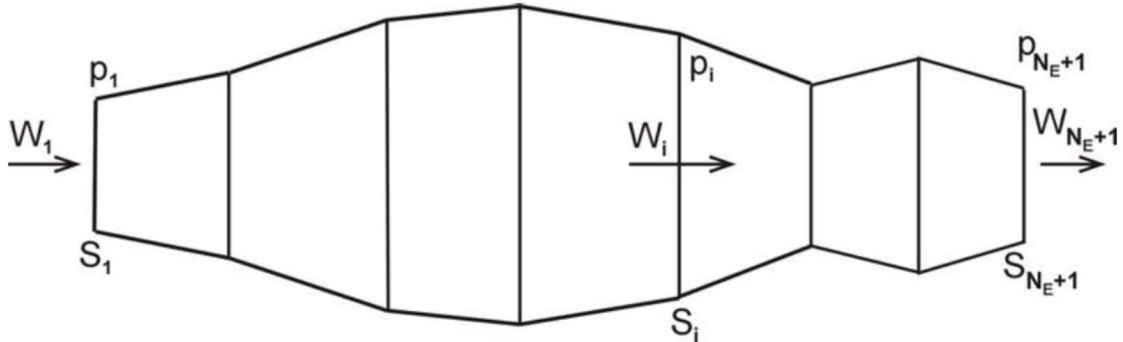
tedy pro kuželový zvukovod bez tlumení

$$\cos(k \cdot L) + \frac{1}{k \cdot \xi_0} \cdot \sin(k \cdot L) = 0 \quad (42)$$

Řešení rovnice budeme hledat numericky.

6.3.4 Vlastní frekvence soustavy elementů modelu vokálního traktu

Seřazením více elementů kuželových zvukovodů získáváme soustavu (Obr. 17:). [2]



Obr. 17: Obecné schéma soustavy elementů [2]

N_E značí počet elementů, ze kterých je soustava složena. Potom sledujeme veličiny v N_{E+1} řezech a pro veličiny na výstupu platí: [2]

$$\begin{bmatrix} p_{N_{E+1}} \\ W_{N_{E+1}} \end{bmatrix} = T_{N_{E+1}} \cdot \begin{bmatrix} p_1 \\ W_1 \end{bmatrix} \quad (43)$$

protože veličiny p , W jsou na výstupu daného elementu rovny s veličinami na vstupu do dalšího elementu. Přenosová matice je ve tvaru: [2]

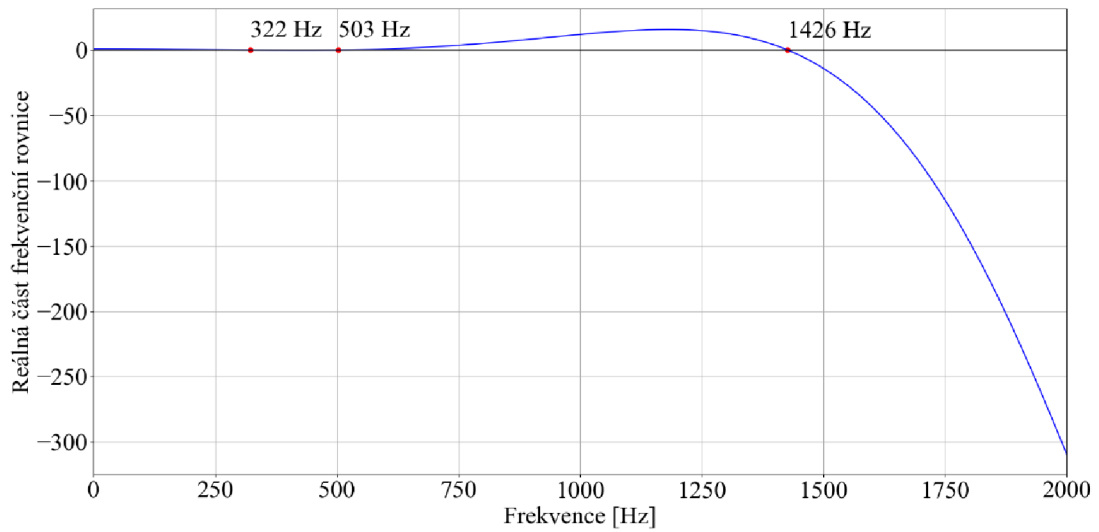
$$T_{N_{E+1}} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \quad (44)$$

Pro okrajové podmínky „U-O“ (uzavřený vstup, otevřený výstup) získáváme rovnici:

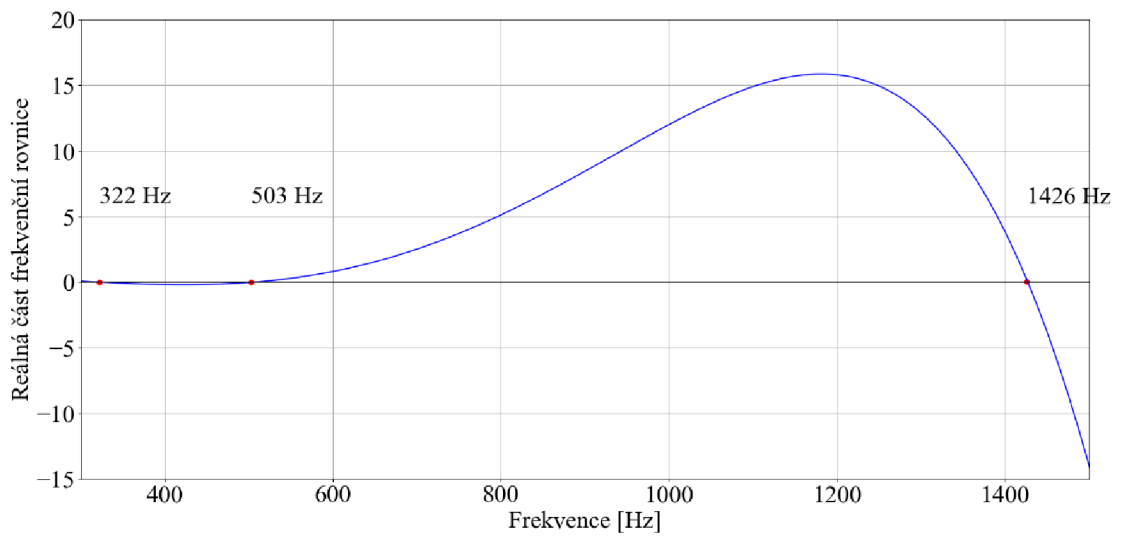
$$\begin{bmatrix} 0 \\ W_{N_{E+1}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (45)$$

Řešení budeme hledat grafickou metodou.

MKP, ovšem první formant vypočtený MPM alespoň spadá do intervalu hodnot naměřených Merhautem [17].



Obr. 19: Řešení modálních charakteristiky grafickou metodou



Obr. 20: Detail řešení

	Hodnoty MKP	Hodnoty MPM	Merhaut [17]
F1 [Hz]	432	322	240–400
F2 [Hz]	889	503	600–1100
F3 [Hz]	1981	1426	–

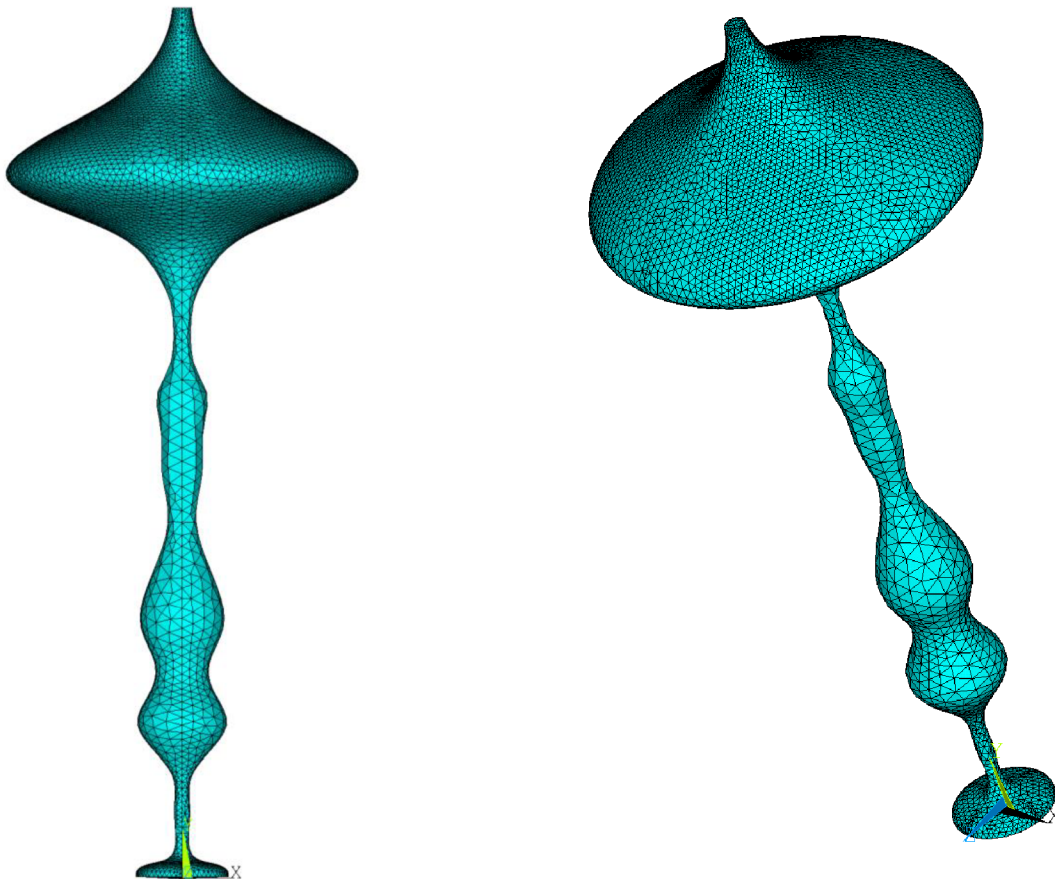
Tab. 3: Tabulka hodnot MKP, MPM a literatury

6.5 3D MKP model

Výsledky získané pomocí MKP a MPM vzájemně neodpovídají. Platnost výsledků MKP jsme již ověřili (viz 6.2.6 Řešení MKP), proto je nutné nalézt důvod odchýlení výsledků MPM. Na rozdíl od našeho 2D řešení získaného MKP počítá metoda přenosových matic modální analýzu pro 3D model, k němuž došlo přetvořením původního 2D modelu s 1D průřezy [2] na 3D model s 2D průřezy. Ke změně geometrie došlo rotací 2D modelu kolem podélné osy. Tím byly změněny průřezy, které nemusejí odpovídat průřezům získaných z MRI. Abychom ověřili hodnoty získané MPM, vytvoříme v ANSYSu odpovídající 3D model vokálního traktu a zjistíme jeho vlastní frekvence.

6.5.1 Model geometrie

3D model byl vytvořen rotací kolem podélné osy z Radolfova 2D modelu. Na Obr. 21: můžeme vidět 3D model použitý pro výpočet MKP.



Obr. 21: 3D model vokálního traktu se sítí

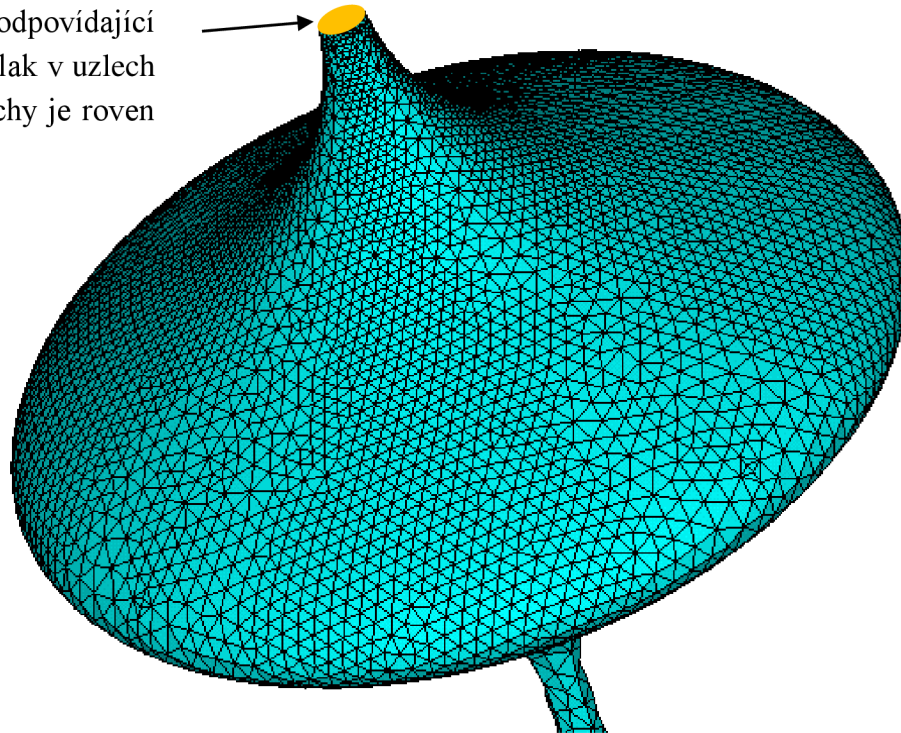
6.5.2 Model sítě

Použitý typ prvku je lineární osmiuzlový FLUID 30. Počet elementů modelu je 71 969. Počet uzlů je 15 603. Počet stupňů volnosti v uzlu je jeden, a to stupeň volnosti tlaku. Síťovali jsme objem čtyřstěny defaultním nastavením (free meshing).

6.5.3 Model okrajových podmínek.

Model má v každém uzlu stupeň volnosti tlak, jako okrajová podmínka byly tedy použity nulové tlaky do uzlů v ústech, čímž se simulují otevřená ústa – tlakový uzel (viz Obr.

Plocha odpovídající ústům, tlak v uzlech této plochy je roven nule.



Obr. 22:).

Obr. 22: 3D model traktu s okrajovými podmínkami

6.5.4 Nastavení programu ANSYS APDL 19.0

K nastavení jsme použili výše uvedené vlastnosti materiálu vzduchu a provedl výpočet pro první 3 formanty. Typ analýzy: modální. Extraction method: Block Lanczos. Globální nastavení matic: symetrická (modální analýza bez tlumení), jedná se o defaultní nastavení.

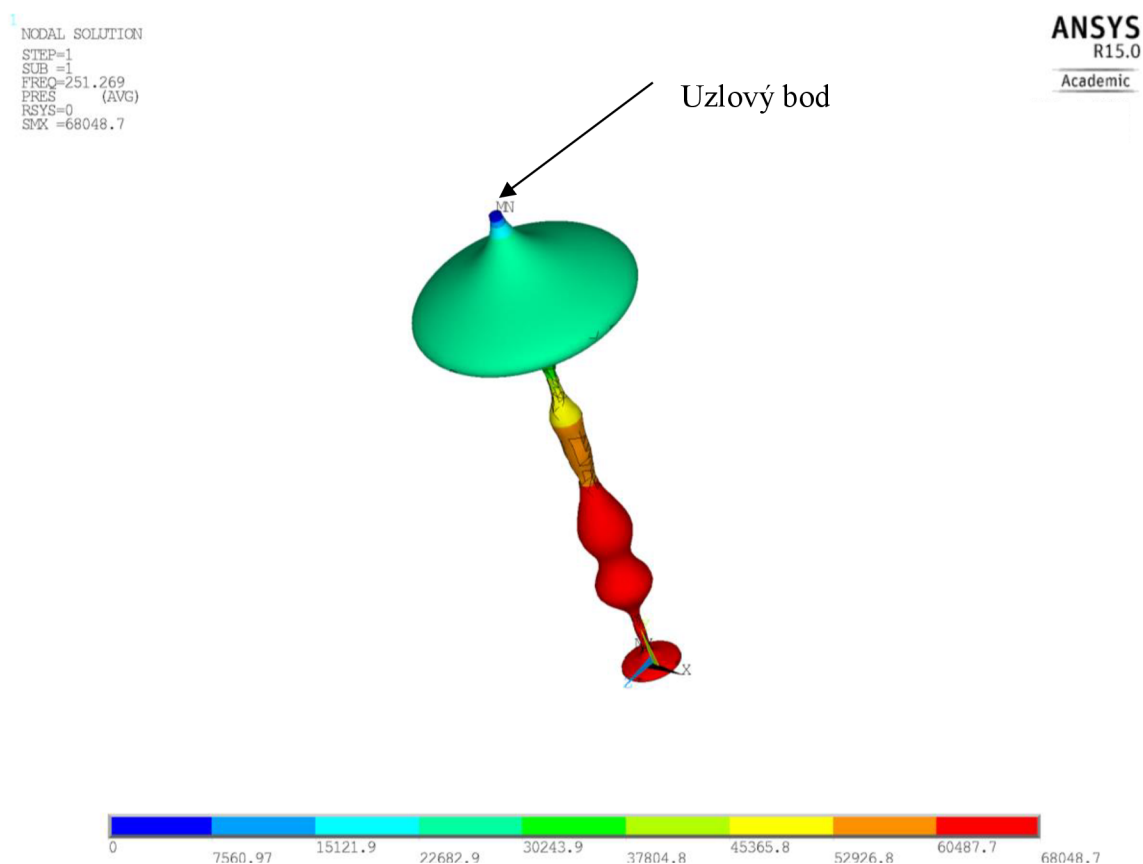
6.5.5 Řešení MKP 3D modelu

Hodnoty prvních tří formantů, získané modální analýzou 3D modelu, můžeme vidět v Tab. 4: . Pro porovnání jsou obsahem tabulky i hodnoty formantů naměřené Merhautem a hodnoty vypočtené metodou přenosových matic.

	Hodnoty MKP	Hodnoty MPM	Merhaut [17]
F1 [Hz]	251	322	240–400
F2 [Hz]	391	503	600–1100
F3 [Hz]	1156	1426	–

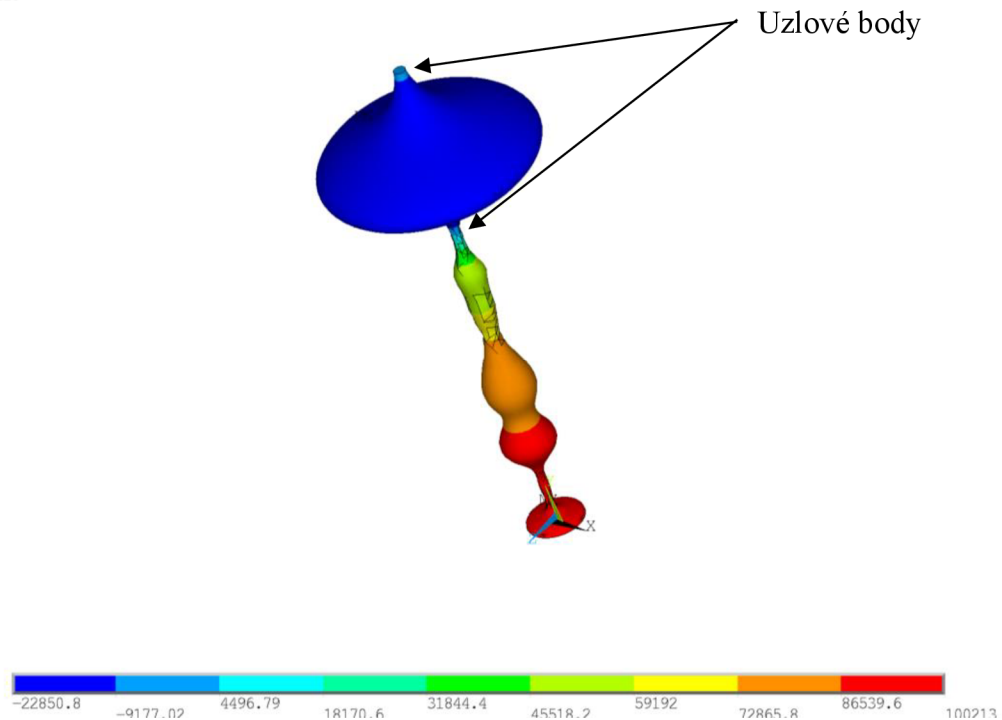
Tab. 4: Vlastní frekvence získané modální analýzou pro samohlásku [u:]

Následující obrázky ukazují rozložení akustického tlaku pro první dvě vlastní frekvence nejdůležitější z hlediska srozumitelnosti. Všechny tvary kmitů jsou podélné. U prvního vlastního tvaru lze vidět uzel tlaku v ústech, tedy v místě zadané okrajové podmínky, a maximum tlaku u hlasivek. U druhého vlastního tvaru se objevují dva uzlové body podobně jako u 2D modelu.



Obr. 23: Průběh tlaku pro 1. vlastní frekvenci

1 NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =2
FREQ=391.156
PRES (AVG)
RSYS=0
SMN =-22850.8
SMX =100213



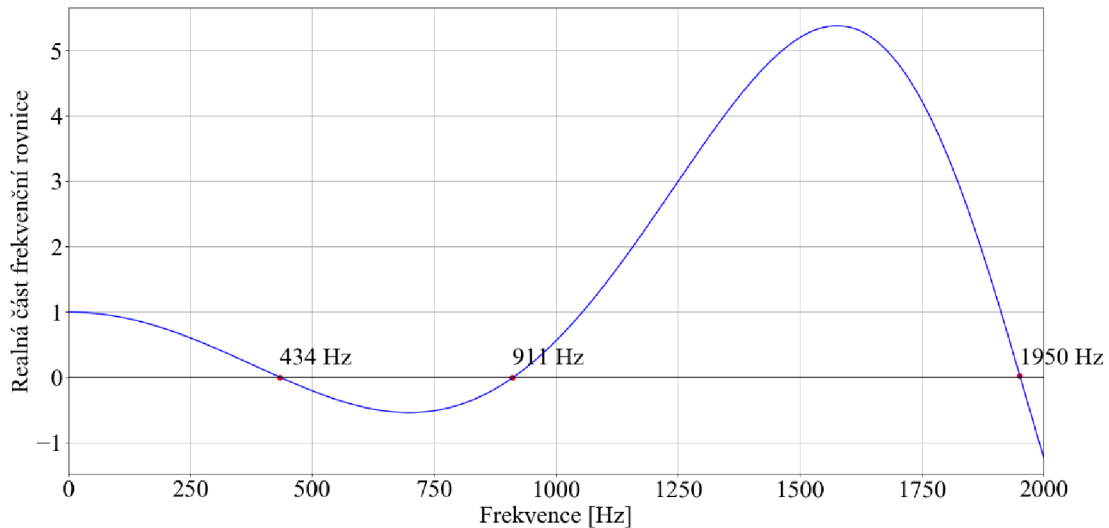
Obr. 24: Průběh tlaku pro 2. vlastní frekvenci

6.6 Ladění metody přenosových matic

Jak bylo uvedeno výše v kapitole 6.5 3D MKP model, výsledky získané metodou přenosových matic neodpovídají výsledkům MKP, můžeme se tedy pokusit přeladit model řešený metodou přenosových matic změnou velikosti průřezu pro získání hledaných vlastních frekvencí.

6.6.1 Výsledky ladění

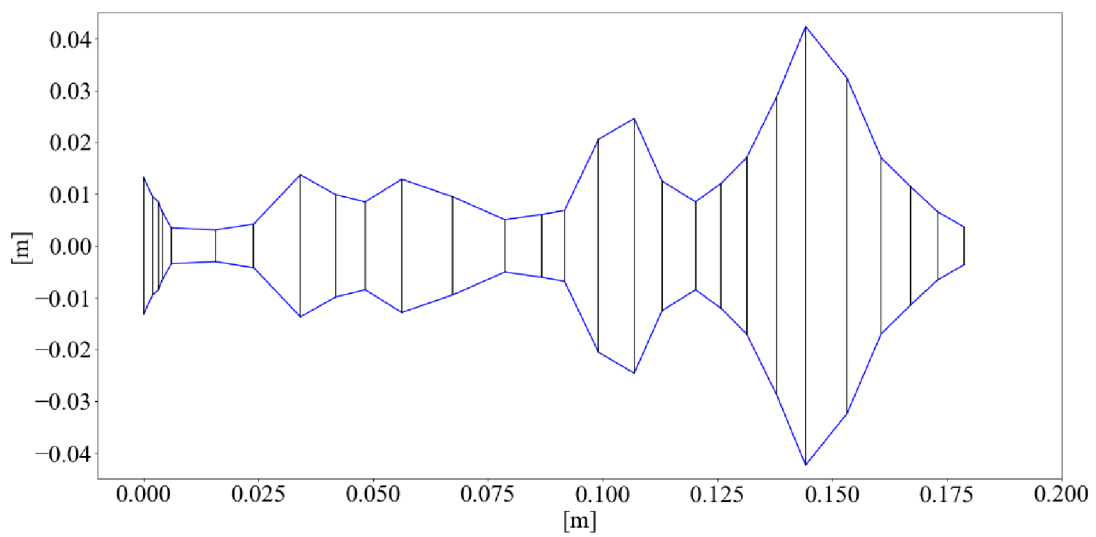
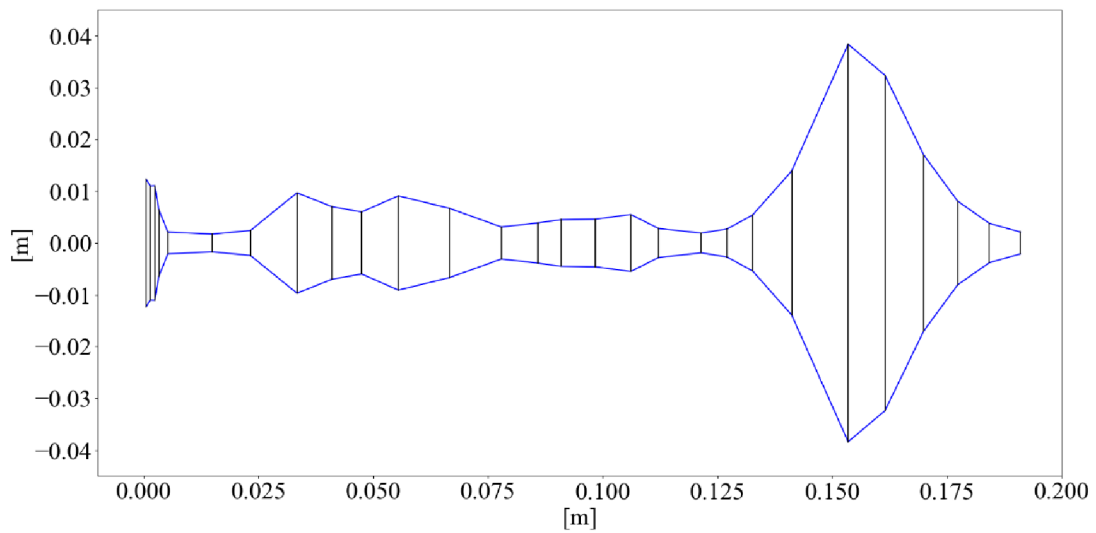
Zásahem do geometrie vokálního traktu jsme dosáhli požadovaných výsledků (Obr. 25: , Tab. 5:). Hlavními změnami prošla nejužší místa traktu, které bylo nutné rozšířit. Na úzká místa je metoda velmi citlivá. Dále byly provedeny úpravy v oblasti hlasivek a rtů (viz Obr. 26:).



Obr. 25: Hodnoty formantů získané grafickou metodou pro upravenou geometrii vokálního traktu

	Hodnoty MKP	Hodnoty MPM (upravený vokální trakt)	Merhaut [17]
F1 [Hz]	432	434	240–400
F2 [Hz]	889	911	600–1100
F3 [Hz]	1981	1950	–

Tab. 5: Hodnoty MKP, MPM (pro upravenou geometrii vokálního traktu), literatura



Obr. 26: Shora: vokální trakt s původní geometrií, vokální trakt s upravenou geometrií

7 ZHODNOCENÍ A DISKUZE

Nejprve byla provedena modální analýza Radolfova 2D modelu [2] v programovém systému ANSYS 19.0. Hodnoty byly porovnány s literaturou. Tím jsme ověřili model v softwaru ANSYS APDL 19.0.

Dále jsme naprogramovali v jazyce Matlab a Python přenosové matice pro kuželové schéma vokálního traktu. Hodnoty získané touto metodou se značně lišily, jak od literatury, tak od hodnot z 2D MKP modelu (viz Tab. 6:). Tento jev byl zřejmě způsoben tím, že jsme srovnávali 2D MKP model s orotovaným 3D MPM modelem, čímž jsme vlastně původní 2D model přeladili (více v kap. 6.5 3D MKP model).

Abychom mohli porovnat hodnoty získané MPM s hodnotami MKP, vytvořili jsme v programu ANSYS 3D model vokálního traktu rotací Radolfova modelu [2]. Provedli jsme jeho modální analýzu.

Hodnoty MPM a MKP pro 3D model se vzájemně přiblížily, avšak stále nesouhlasili (Tab. 6:). Odchylka mohla být způsobena citlivostí MPM na úzké průřezy [20], případně lineárním proložením bodů (MPM model) a splinem (3D MKP model).

U MPM byla provedena úprava geometrie vokálního traktu, s cílem získat formanty odpovídající řešení modální analýzy 2D MKP modelu. MPM lze snadno ladit, proto úprava proběhla úspěšně.

	MKP	MPM	MKP 3D	MPM (upravený vokální trakt)	Merhaut [17]
F1 [Hz]	432	322	251	434	240–400
F2 [Hz]	889	503	391	911	600–1100
F3 [Hz]	1981	1426	1156	1950	–

Tab. 6: Hodnoty pro první tři formanty

Na základě řešených úloh jsme mohli porovnat MKP a metodu přenosových matic.

Výhodou metody přenosových matic je zejména rychlost řešení samotné úlohy, dále pak jednoduchá programovatelnost úlohy, nízká náročnost na hardware, možnost použití nekomerčního softwaru a možnost snadného ladění. Nevýhodou MPM je krom výsledků citlivých na úzké průřezy také nutnost znalosti programovacího jazyka a znalost matematiky.

Výhodami MKP je možnost tvorby modelů vyšší úrovně, jejich relativně jednoduchá tvorba a práce v intuitivním grafickém prostředí. Na druhou stranu jsou výpočty na pozadí složité a časově náročné, s čímž souvisí i hardwarová náročnost.

8 ZÁVĚR

V první části práce je popsána anatomie a fyziologie spojená se vznikem a modifikací lidského hlasu. Součástí rešerše je i stručný přehled patologických jevů. Následuje souhrn výpočtových modelů využívaných při řešení charakteristik vokálního traktu v literatuře.

V praktické části bakalářské práce byla řešena modální analýza 2D modelu vokálního traktu pro samohlásku [u:] metodou konečných prvků v programovém systému ANSYS APDL 19.0. Získané hodnoty byly porovnány s literaturou.

Následovalo odvození metody přenosových matic pro kuželový vokální trakt a její praktické využití pro výpočet vlastních frekvencí v programovacím jazyce Matlab. Modelem, pro který byla počítána modální analýza metodou přenosových matic, byl otrotovaný dříve počítaný 2D model, čímž vznikl 3D model s odlišnými modálními charakteristikami. Abychom mohli výsledky získané metodou přenosových matic ověřit s hodnotami metody konečných prvků, vytvořili jsme v programu ANSYS APDL 19.0 rotaci původního 2D modelu 3D model, pro který jsme spočítali modální analýzu.

V závěru praktické části jsme ladili metodu přenosových matic změnou geometrie vokálního traktu za účelem získat hodnoty formantů uvedených v literatuře.

Vlastní frekvence obdržené metodou konečných prvků odpovídají výsledkům uvedeným v literatuře. Nespornou výhodou metody konečných prvků je dostupnost pokročilého softwaru (ANSYS), který nabízí grafické a tím uživatelsky příjemné prostředí, ve kterém lze lehce tvořit modely vysoké úrovně. Na druhou stranu mezi hlavní nevýhody patří časová náročnost spojená s obecně vysokými požadavky na hardware.

Výsledky obdržené metodou přenosových matic zcela neodpovídaly ani hodnotám z literatury ani hodnotám vypočtených metodou konečných prvků. To může být způsobeno citlivostí metody na úzké průřezy a modelování na nízké úrovni. Výhodou této metody je menší počet operací spojených s kratšími výpočetními časy a nižší náročnost na vybavení hardwaru. Dalším plusem této metody je snadné ladění modelu. Oproti metodě konečných prvků musí mít uživatel rozšířené znalosti matematiky a programovacího jazyka.

Porovnáním obou metod jsme dospěli k závěru, že metodu přenosových matic lze využít pro velké množství výpočtů a ladění konkrétních parametrů. Oproti tomu metoda konečných prvků se zdá být vhodnější pro závěrečné (odladěné) výpočty, avšak s rozvojem informačních technologií a dostupností výkonných hardwarů se rozdíl v rychlosti mezi metodou konečných prvků a metodou přenosových matic téměř smazává, navíc metoda konečných prvků je dostupná ve velkém množství komerčních balíků, proto je dnes velmi využívána.

9 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] SOKOL, Jan. *Filosofická antropologie: člověk jako osoba*. Praha: Portál, 2002. ISBN 80-7178-627-6.
- [2] RADOLF, Vojtěch. Direct and inverse task in acoustics of the human vocal tract. 2010, 95.
- [3] TITZE, Ingo R. *Principles of voice production*. Englewood Cliffs, N.J.: 1994. ISBN 0-13-717893-X
- [4] MIŠUN, Vojtěch. *Tajemství lidského hlasu*. B.m.: Vysoké učení technické v Brně, 2010. ISBN 978-80-214-3499-8.
- [5] KRČMOVÁ, Marie. *Fonetika a fonologie* [online]. 3. vyd. B.m.: Masarykova univerzita, 2009. Elportál. ISSN 1802-128X. Dostupné z: <http://is.muni.cz/elportal/?id=852835>
- [6] ČIHÁK, Radomír. Anatomie 2. 2013, 512.
- [7] ŠVEC, Jan G. Studium mechanicko-akustických vlastností zdroje lidského hlasu. 1996.
- [8] MATUG, Michal. Analysis of Czech Vowels to Be Generated Aloud and in a Whisper [online]. 2008, 67. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=6629
- [9] DRŠATA, Jakub a CHROBOK VIKTOR. *Foniatrie*. Havlíčkův brod: Tobiáš, 2011. ISBN 978-807-3111-168.
- [10] HÁJEK, Petr. Výpočtové modelování samobuzeného kmitání lidských hlasivek. 2016, 33.
- [11] ČERNÝ, Libor a Jan VOKŘÁL. *Atlas onemocnění hlasu a řeči*. [online]. 2016. Dostupné z: <http://atlas.lf1.cuni.cz/ohr/uvodni-slovo-158.html>
- [12] FRIEDMAN, Aaron D. *Recurrent Respiratory Papillomatosis* [online]. Dostupné z: <https://voicesurgeon.net/recurrent-respiratory-papillomatosis-rrp/>
- [13] JANÍČEK, Přemysl. *Systémové pojetí vybraných oborů pro techniky: hledání souvislostí: učební texty I*. Vyd. 1. Brno: CERM, 2007. ISBN 978-80-7204-556-32.
- [14] ŠVARC, Martin. Computational Modelling of Human Voice Propagation Through the Vocal Tract and in Space Around Head [online]. 2014, 82. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=86900
- [15] TOMEČEK, Vojtěch. Využití metody konečných prvků pro modelování šíření hlasu vokálním traktem a okolo hlavy člověka. 2013, 73.
- [16] DABBAGHCHIAN, Saeed, Marc ARNELA a Olov ENGWALL. Simplification of vocal tract shapes with different levels of detail. *18th International Congress of Phonetic Science*. 2015, 1–5.
- [17] MERHAUT, Josef. Základy fyziologické akustiky a teorie přirozených akustických signálů. 1972.
- [18] HÁJEK, Petr, Pavel ŠVANCARA a Jan G. ŠVEC. Numerical Simulation of the Self-oscillating Vocal Folds in Interaction with Vocal Tract Shaped for Particular Czech Vowels [online]. 2017, **519**, 317–323. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-319-46490-9
- [19] MALENOVSKÝ, Eduard. Studijní opora z předmětu Počítačové metody mechaniky v dynamice [online]. nedatováno, 1–39. Dostupné z: http://www.umt-old.fme.vutbr.cz/~pkrejci/opory/pmm_dyn/down.html
- [20] RYŠAVÝ, Antonín. Výpočtové modelování funkce lidského vokálního traktu Stručná. 2016.

10 SEZNAM SYMBOLŮ

Symbol	Rozměr	Veličina
Φ	$[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$	Rychlostní potenciál
c_0	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$	Rychlost šíření zvuku v prostředí
C_i	$[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$	Konstanty
F_i	[Hz]	Formant
f	[Hz]	Frekvence harmonického signálu
j	$[\text{m}^{-1}]$	Komplexní exponent
k	$[\text{m}^{-1}]$	Vlnové číslo
p	[Pa]	Akustický tlak
r_N	$[\text{m}^{-1}]$	Specifický akustický odpor zvukovodu (normovaný)
r_s	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}]$	Specifický akustický odpor zvukovodu na jednotku délky
$S(x)$	$[\text{m}^2]$	Proměnný průřez
t	[s]	Čas
v	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$	Vektor akustické rychlosti
W	$[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$	Objemová rychlost (objemový tok)
x	[m]	Podélná souřadnice zvuku
z_0	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}]$	Vlnový odpor prostředí
λ	[m]	Vlnová délka
ξ	[m]	Podélná souřadnice
ρ	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$	Okamžitá hustota prostředí
ρ_0	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$	Stálá (klidová) hustota prostředí
Ψ	$[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$	Amplitud rychlostního potenciálu
ω	$[\text{s}^{-1}]$	Úhlová frekvence harmonického signálu

11 SEZNAM PŘÍLOH

Příložené CD obsahuje:

CD-ROM:\Meisner_Patrik_BP_2018_CD\BC_MAKRO_ANSYS_2D.txt

CD-ROM:\Meisner_Patrik_BP_2018_CD\BC_MAKRO_ANSYS_3D.txt

CD-ROM:\Meisner_Patrik_BP_2018_CD\BC_MAKRO_PUVODNI_MODEL.m

CD-ROM:\Meisner_Patrik_BP_2018_CD\BC_MAKRO_UPRAVENY_MODEL.m